



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## KONSTRUKCE PARNÍHO STROJE

DESIGN OF A STEAM ENGINE

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matěj Duchoň

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Košťál, Ph.D.

BRNO 2021



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	<b>Matěj Duchoň</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. David Košťál, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Konstrukce parního stroje

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Parní stroje stály na počátku průmyslové revoluce a jejich nasazení pro pohon vozidel a strojů způsobilo rozmach techniky a strojního oboru samotného do dnešních měřítek. Jako jedny z prvních strojů dokážou díky své jednoduchosti poskytnout vhled do fungování moderních komplexních strojů.

Typ práce: vývojová – konstrukční

**Cíle bakalářské práce:**

Cílem práce je zkonstruovat model jednoválcového statického parního stroje poháněného vnějším zdrojem tepla. Maximální rozměr stroje (h x š x v) 300 x 400 x 300 mm, maximální hmotnost 15 kg.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- rešerše konstrukčních řešení parních strojů,
- tvorba konceptů možného řešení,
- konstrukce zvoleného řešení parního stroje.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske–studium–ukoncení/>

**Seznam doporučené literatury:**

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, Ch.R., BUDYNAS, R.G.: Konstruování strojních součástí. Překlad 7. vydání, VUTUM, Brno 2010, 1186 s, ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty



## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukcí modelu jednoválcového statického parního stroje poháněného vnějším zdrojem tepla. Kde limitující parametry jsou celkové rozměry a váha stroje. V rámci práce byla provedena rešerše existujících provedení, na jejímž základě byla zpracována tři koncepční řešení. Výsledkem je konstrukční řešení parního stroje v konfiguraci s plochým šoupátkem a otevřeným vedením křížáku. Model slouží jako pomůcka pro pochopení principu dřívějších pístových strojů a k vysvětlení základních strojních mechanismů a termodynamického děje.

## KLÍČOVÁ SLOVA

parní stroj, model, pára, stacionární

## ABSTRACT

This bachelor theses deals with a construction of a model of a single-cylinder static steam engine driven by an external heat source. In this construction, the overall size and weight were limiting. As a part of this theses, the research on existing constructions was carried out. Based on these findings, three conceptual studies were elaborated. As a result, a design solution of a steam engine in a configuration with a flat slide valve and an open crosshead guidance was designed. The model serves as a teaching aid for understanding the principles of the earlier piston machines and for explaining the basic machine mechanisms and thermodynamic process.

## KEYWORDS

Steam engine, model, steam, stationary



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DUCHOŇ, Matěj. *Konstrukce parního stroje* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132010>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce David Košťál.



## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Davidu Košťálovi, Ph.D. za cenné rady, čas a trpělivost při vedené mé bakalářské práci. Rád bych také poděkoval své rodině za umožnění studia a jejich podporu.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Davida Košťála, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>14</b>
2.1	Vývoj parních strojů	14
2.2	Druhy parních strojů	17
2.2.1	Parní stroje s dělenou expanzí	19
2.3	Rozvody parních strojů	21
2.3.1	Jednoduché ploché šoupátko	22
2.3.2	Corlisova šoupátka	23
2.3.3	Pístové šoupátka	24
2.3.4	Trickovo šoupátko	24
2.3.5	Ventilové rozvody	25
2.4	Regulátory	26
2.4.1	Regulátory objímkové	26
2.4.2	Ploché regulátory	28
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>29</b>
3.1	Analýza problému	29
3.2	Cíl práce	29
<b>4</b>	<b>KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>30</b>
4.1	Parní stroj s pístovým šoupátkem a s otevřeným vedením křížáku	30
4.2	Parní stroj s plochým šoupátkem a s uzavřeným vedením křížáku	31
4.3	Parní stroj s plochým šoupátkem a bočním uložením komory	32
4.4	Celkové zhodnocení	33
<b>5</b>	<b>KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>34</b>
5.1	Popis konstrukčního řešení parního stroje	35
5.1.1	Konstrukce rozvodu páry do válce	38
5.2	Regulace	39
5.2.1	Škrťací klapka	40
5.3	Kotel	42
5.4	Výpočty	43
5.4.1	Výpočet výkonu parního stroje	43

5.4.2	Výpočet spotřeby páry	46
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>47</b>
6.1	Možné problémy	47
6.1.1	Těsnění válce a kotle	47
6.1.2	Kondenzace	47
6.1.3	Stav vody v kotli	49
6.1.4	Mazání	49
6.2	Seřízení rozvodů	51
6.3	Spuštění stroje	52
6.4	Cenový odhad	52
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>53</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>54</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>57</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>59</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>61</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>62</b>



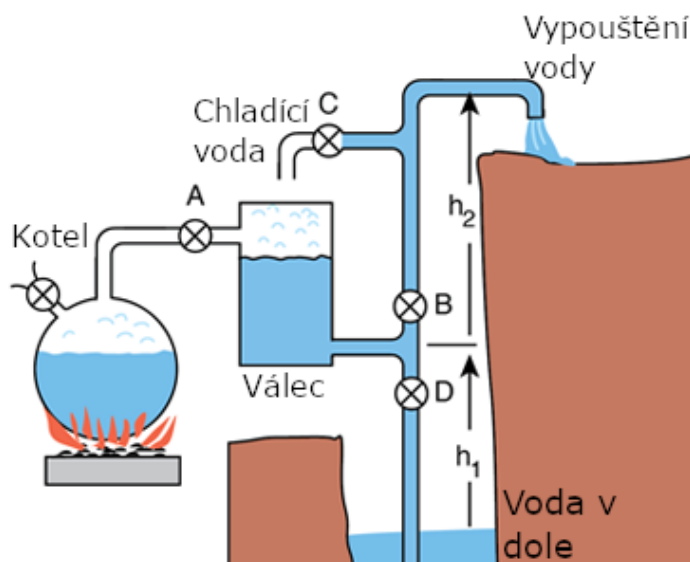
# 1 ÚVOD

Pístový parní motor nebo též parní stroj, patří mezi zásadní vynálezy 18. století. Jeho vznik nám dal základy moderní technologie a změnil od základu téměř celý svět. Od 19. století, kdy se stroje poháněné parou začaly naplno využívat, byli lidé ušetřeni namáhavé práce a jejich život byl náhle jednodušší. Významnou roli hrál stroj v průmyslu, energetice a cestování. Parní stroj obsahovala každá lokomotiva, parník, každá větší továrna disponovala transmisemi a na polích se objevovaly parní oračky a mlátičky. Pro jeho snadnou údržbu a jednoduchou konstrukci byl využíván už v dobách, kdy strojírenství bylo na počátku svého rozkvětu. Parní stroj pracuje na principu přeměny tepelné energie vodní páry na energii mechanickou. Tyto stroje fungují na základě prvního termodynamického zákona, to znamená, že teplo a práce jsou vzájemně směnitelné. Jeho největší nevýhoda a důvod, proč už se v dnešní době nevyužívá, je jeho nízká účinnost a masivnost.

V pozdějších dobách jej pomalu nahrazovaly modernější a účinnější spalovací motory, ale stále měly parní stroje své využití, hlavně u lokomotiv a lodních strojů velkých výkonů, které využívaly výhody hospodárnosti při vysokém tlaku páry. Dokonce i v dnešní době stroj najde své využití. Můžeme ho v kombinaci s polomotorem nalézt v některých kotelnách, které využívají vysokou termodynamickou účinnost parního stroje, oproti konkurenční parní turbíně. Na rozdíl od turbíny má výhodu, že neztrácí účinnost ani při změně parametru páry a stroj můžeme i do určité míry přetížit. Ačkoli se může zdát, že jeho vývoj je zcela u konce, není tomu tak, některé firmy se stále snaží stroj zdokonalovat a najít jeho využití i přes jeho nevýhody.

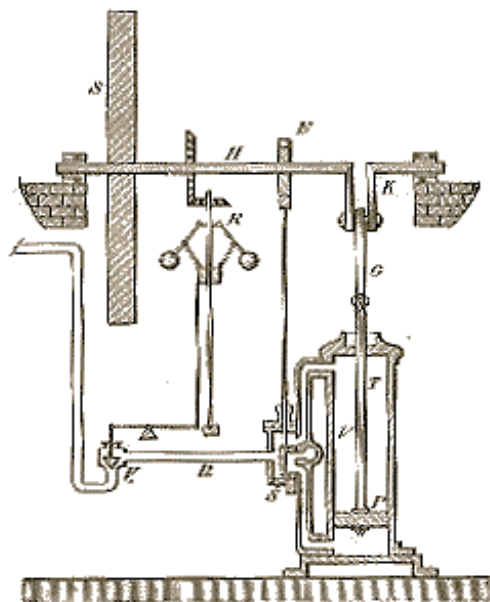


Newcoman ale nebyl jediný, kdo se na vývoji parního stroje podílel. Důležitou osobou byl i známý vynálezce Thomas Savery, který si jako první nechal parní stroj patentovat. Savery sice měl patent, ale potýkal se s technologickým problémem, jak vyrobit píst či nádobu, která by vydržela vyšší tlak [2]. Později, kdy byl problém vyřešen, navrhl Savery téměř nepřetržitý systém pro čerpání vody z dolů. Avšak záhy se zjistilo, že jeho motor je schopný čerpat vodu jen z mělkých hloubek [1].



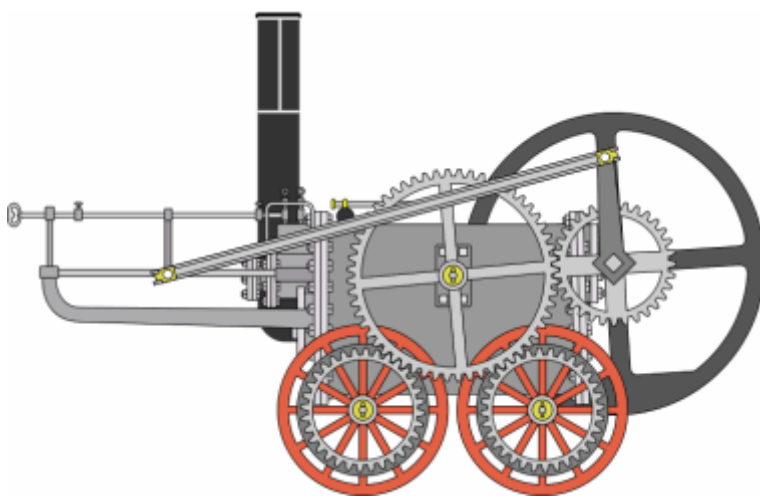
**Obr. 2-2** Schéma Saveryho stroje na čerpání vody z dolů; Kotel produkuje páru, která má větší tlak než okolní atmosféra. Jestliže jsou ventily A a B otevřené a zároveň B a D uzavřené, pak tlak páry odčerpá vodu do výšky  $h_2$ , kde je následně vylita do okolí. Poté je do válce přivedena studená voda, která páru kondenzuje a snižuje její tlak. Výsledné vakuum způsobí, že voda klesne do výšky  $h_1$  a proces se opakuje [8].

Ačkoli oba vynálezci dali základy parnímu stroji, a pokoušeli se jej sestavit, ani jeden se strojem neuspěl. Na konci platnosti patentu v roce 1733 pracovalo v Anglii přibližně 125 Newcomenových strojů [2]. V pozdější době se o zdokonalení stroje snažil technický genius James Watt. Nepřekonatelný problém výroby pístu či parního válce, se kterým se potýkal Savery, byl vyřešen pomocí vrtání, které se v té době využívalo pro výrobu dělových hlavních, a Wattovi už nestál v cestě žádný problém. Jeho dokonalý nápad kondenzovat páru mimo parní válec a tím ušetřit mnoho tepelné energie, vyřešil problém s účinností a stroj byl schopen spotřebovat o dvě třetiny méně paliva. Díky tomu roku 1775 dokončil montáž dvou prvních parních strojů, jeden sloužil k pohonu dmychadla vysoké pece a druhý čerpal vodu v uhelných dolech. Watt se ale stále pokoušel stroj zdokonalovat a snažil se vymyslet univerzální parní stroj s rotačním pohybem, do té doby byl stroj schopen pouze přímočarého pohybu. Watt později přišel na nápad využít obou zdvihů ve válci, tím se zrodil dvojčinný parní stroj, který měl dvojnásobný výkon při stejné spotřebě a stejných rozměrech jako předchozí jednočinný parní stroj [3]. Další důležitý Wattův vynález pro zdokonalení stroje byl odstředivý regulátor, který reguloval přívod páry a tím udržel konstantní otáčky. Tak byl parní stroj připraven pro další jeho využití.



**Obr. 2-3** Schéma Wattova parního stroje s odstředivým regulátorem [4].

Teprve v roce 1800 se potenciál parního stroje mohl využít naplno, jelikož do té doby stále platily Wattovy patenty, které znemožňovaly další vývoj a využití stroje. Richard Trevithick jako první dosáhl do té doby nevídaného vysokého tlaku ( $10 \text{ kg/cm}^2$ ) s experimentálním strojem, který pracoval bezpečně a účinně. Tohoto poznatku využil a vyrobil první úspěšnou lokomotivu pro tramvajovou dráhu (obr.2-4). Vynález se však komerčního úspěchu nedočkal, protože lokomotiva polámala tramvajové koleje vyrobené z litiny. Na dalším zlepšení se podílel Arthur Woolf, který poprvé využil sdružený parní stroj, v němž byla pára využita dvakrát i vícekrát s klesajícím tlakem, než byla nakonec kondenzována nebo vypuštěna. Tento typ stroje se využíval v druhé polovině 19. století k pohonu lodí a čerpadel v dolech [4].



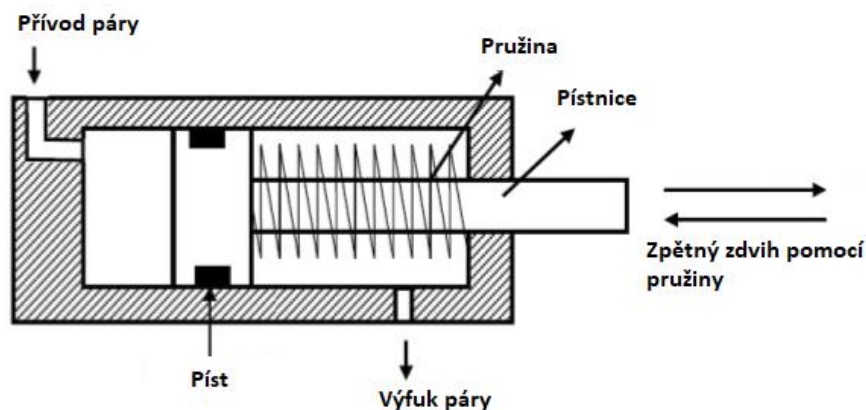
**Obr. 2-4** První parní lokomotiva, kterou vynalezl Richard Trevithic roku 1804 [5].

K dalšímu rozšíření využití parního stroje přispěl rozvoj elektřiny v 80. letech 19. století, kdy bylo snahou strojem pohánět dynamo na výrobu elektřiny. Problémem bylo dosažení dostatečně velkých otáček pístového parního stroje, při kterých by dynamo pracovalo účinně. Jedno z řešení bylo uzavření pohyblivých částí stroje do pouzdra a jejich mazání pod tlakem. Tímto řešením disponoval Wilansův stroj, který se uplatnil v prvních britských elektrárnách. Později byla vynalezena parní turbína, která byla tak převratným vynálezem, že úplně zastínila využití pístového parního stroje pro výrobu elektřiny [4].

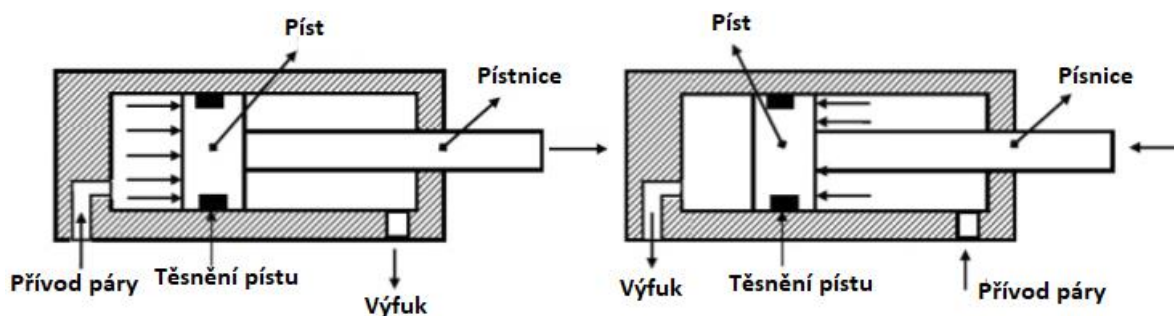
## 2.2 Druhy parních strojů

Parní stroje můžeme rozdělit do několika skupin. Během vývoje bylo vyvinuto několik strojů, které se lišily svým uspořádáním, výkonem a principem, kterým pracovaly.

Podle počtu pracovních zdvihů dělíme stroje na jednočinné a dvojčinné. U jednočinného parního stroje se pára přivádí z jedné strany pístu a při každé otáčce klikového hřídele se vytvoří jeden pracovní zdvih. Pro posuv pístu v opačném směru používá stroj setrvačnick nebo pružinu. Nejčastěji bývají parní stroje dvojčinné, to znamená, že pára pracuje po obou stranách pístu a během každé otáčky klikového hřídele jsou vytvářeny dva pracovní zdvihy. Dvojčinný parní stroj produkuje dvakrát tolik energie, než kolik vyrábí jednočinný parní stroj [8].



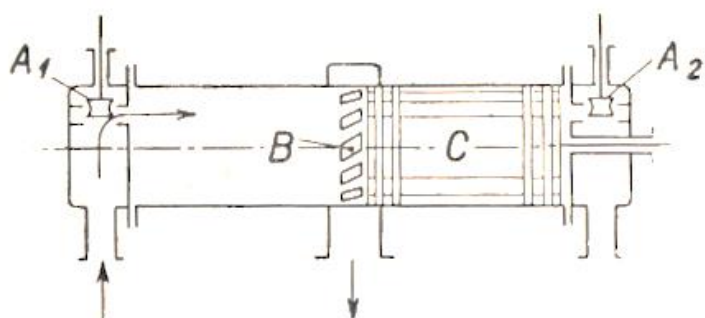
Obr. 2-5 Schéma jednočinného válce [11]



Obr. 2-6 Schéma dvojčinného válce [11]

Stroje rozdělujeme i podle toho, jakým způsobem vyfukují páru, a to na kondenzační a výfukové. Stroj vyfukující páru do vzduchu je výfukový, vypouští-li ji do kondenzátoru je kondenzační. Kondenzační stroje jsou sice složitější a rozsáhlejší než stroje výfukové, ale vykazují velkou úsporu spotřeby páry, tepla i paliva, a to až o 20-30 % [9].

Podle rozvodu dělíme parní stroje na šoupátkové a ventilové. Zvláštní řešení v této kategorii je stejnosměrný neboli souproudý motor, který má podobné rozvody jako u dvoudobého spalovacího motoru. Pára zachovává u vstupu i výstupu stále stejný směr, díky tomu se neochlazuje tolik vstupní prostory válce a stroj má pak nižší spotřebu páry [9].



Obr. 2-7 Schéma stejnosměrného parního stroje; Pára vstupuje do válce vstupními ventily  $A_1$ ,  $A_2$ , pak vystupuje skrz rozpory ve válci B, do kondenzátoru. Tento výstup je řízen parním pístem C [9].

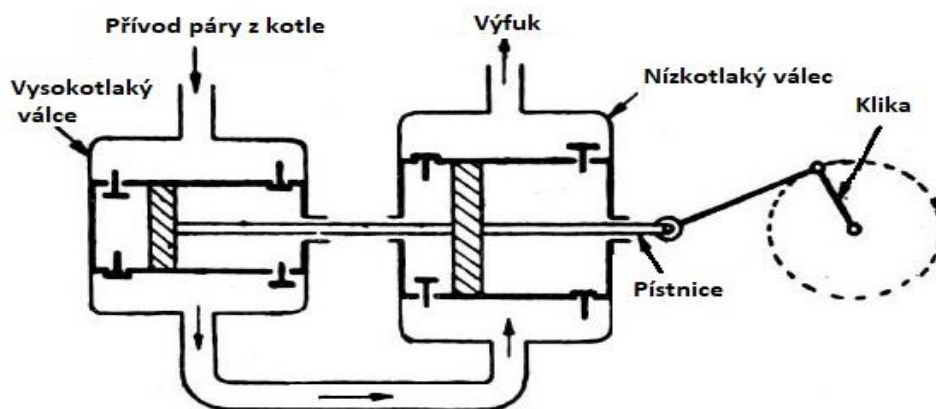
Se zřetelem na působení páry můžeme parní stroje rozdělit na plnotlaké a expanzní. Působí-li plný tlak páry po celý zdvih pístu, mluvíme o plnotlakém parním stroji. Jejich nevýhodou je, že mají velkou spotřebu páry, proto se téměř nevyužívají. Téměř vždy bývají parní stroje expanzní, to znamená, že plnění je menší než 100 %. Válec se naplní množstvím páry, poté se přívod uzavře a díky expanzi páry je píst tlačěn opačným směrem. Plnění bývá značně rozdílné a závisí na druhu rozvodu stroje, jeho velikosti a zatížení. Pro několikanásobné snížení spotřeby a zvýšení efektivity stroje se uplatnily parní stroje s dělenou expanzí páry nebo také jinak řečeno, sdružené parní stroje [9].

## 2.2.1 Parní stroje s dělenou expanzí

Parní stroje s dělenou expanzí pracují na jednoduchém principu nechat páru expandovat postupně v několika válcích za sebou, které zvětšují svůj průměr. Tyto válce jsou navrženy tak, aby rozdělily práci na stejné podíly pro každou fázi expanze. Tím se lépe využije energie páry, která má možnost vyexpandovat na nižší tlak a vydat ze sebe více práce a snížit tím spotřebu. V každém válci probíhá úplný pracovní cyklus s plněním, expanzí, výfukem a kompresí. První válec se vždy nazývá vysokotlaký, má nejmenší průměr a pára v něm expanduje jen z části. V posledním válci, který se nazývá nízkotlaký, se expanze páry dokončí. Mezi vysokotlakým a nízkotlakým válcem může být i střední válec, který se vyskytuje u trojstupňové a čtyřstupňové expanze. Nejčastěji bývá stroj s dělenou expanzí kondenzační. U dělené expanze se používá vyšší vstupní tlak než u jednoduché expanze, a to 1,5-2 MPa. Tím dosáhneme stejné práce i při výrazně menším plnění válce. To má za následek i menší spotřebu páry. Z toho důvodu, že stroj s dělenou expanzí je konstrukčně složitější a má i více součástí, je jeho účinnost nižší než u jednoválcových strojů, a to až o 2-4 % u expanze trojnásobné [9].

Jedno z nejčastějších uspořádání je s dvojnásobnou expanzí. Je vybaven dvěma válci, které mají stejný zdvih a rozdílné průměry válců. Jejich rozměry se volí, aby jejich jednotlivé práce byly přibližně stejné. Stroje s dvojnásobnou expanzí mohou být rozděleny podle uspořádání klik a úhlů mezi nimi nebo seřazení válce buď za sebou nebo vedle sebe [9].

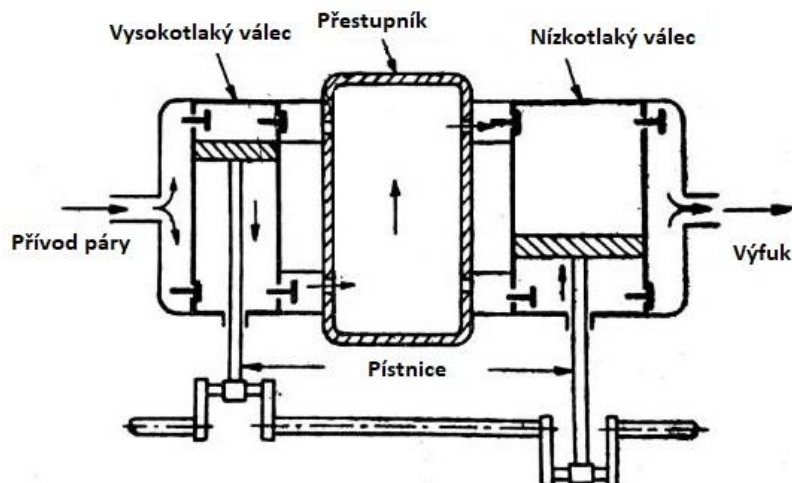
Výhodou válců za sebou je, že mají jednu společnou pístnici, společný křížák, ojnici i kliku. Toto uspořádání je vhodné pro přehřátou páru. Tímto uspořádáním disponuje tandemový parní stroj, který pracuje na jednoduchém principu (obr.). Jeho nevýhodou je složitá montáž a velice proměnlivý krouticí moment. Při natočení klikové hřídele v  $0^\circ$  je krouticí moment téměř nulový. Tento problém se řeší velkými setrvačníky [9][10].



Obr. 2-8 Tandemové uspořádání parního stroje [10]

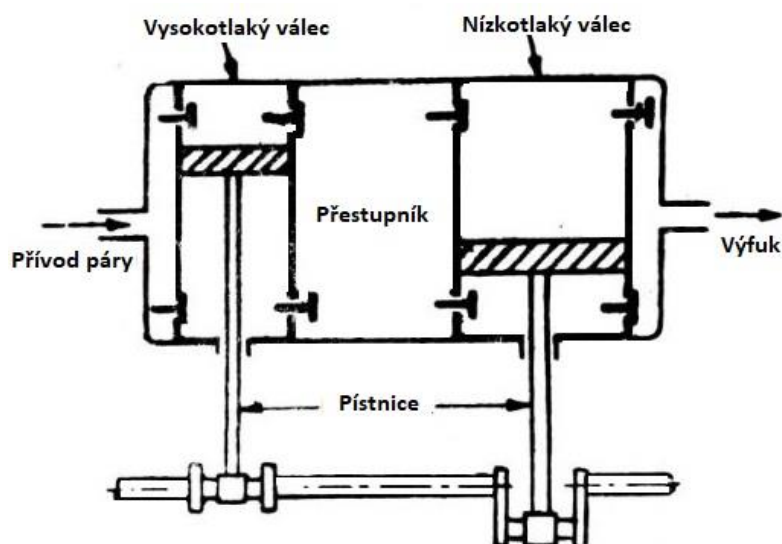


Jsou-li válce seřazeny vedle sebe, mají zpravidla oddělené pístnice připevněné ke dvěma různým klikám, které jsou navzájem pootočené o  $180^\circ$ . Tomuto parnímu stroji se říká Woolfický. Tento typ stroje má stejnou nevýhodu jako tandemový. Z důvodu toho, že jsou kliky navzájem pootočené o  $180^\circ$ , jsou oba cykly ve fázi. To způsobuje velké změny kroutícího momentu na klikové hřídeli, proto je zapotřebí velký setrvačnick [9][10].



Obr. 2-9 Woolfický parní stroj [10]

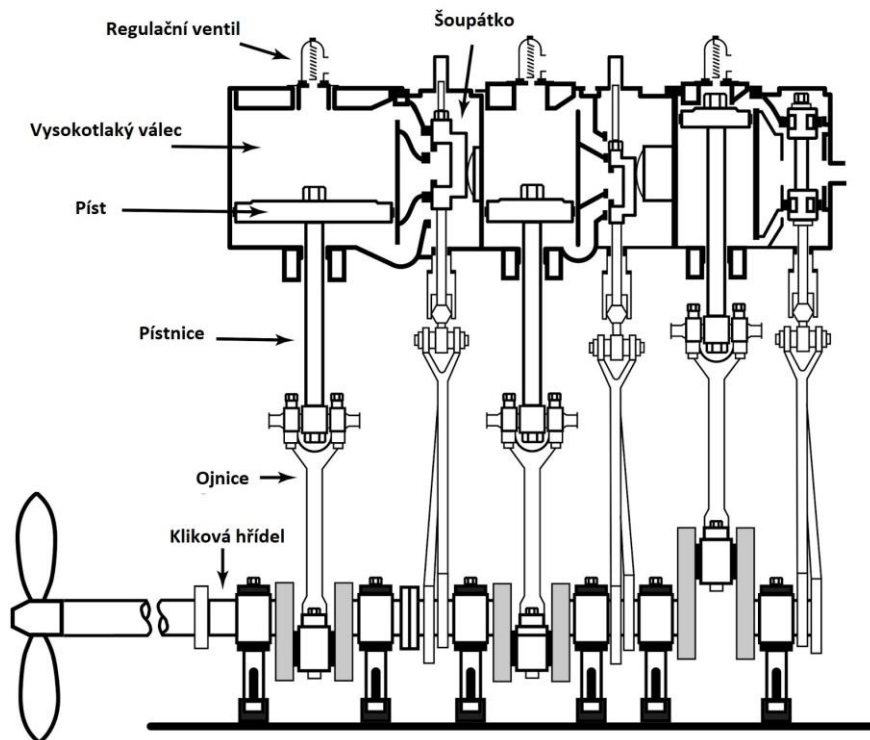
Problém s proměnlivým kroutícím momentem řeší sdružený parní stroj, který má kliky navzájem pootočené o  $90^\circ$ . Jejich největší výhodou je, že je lze spustit z kterékoliv polohy bez natočení setrvačnicku, jelikož je stroj vždy rozkročen. Sdružený stroj disponuje výrazně plynulejším kroutícím momentem, proto můžeme použít menší setrvačnick. Mezi oběma válci bývá někdy přestupník, který vyrovnává tlakové změny při přepouštění páry z jednoho válce do druhého [9][10].



Obr. 2-10 Sdružený parní stroj [10]



Další velice používané uspořádání je s trojnásobnou expanzí. Pára se přivádí do vysokotlakého válce, kde expanduje jen částečně. Pak se vede do středního válce, kde znovu expanduje a konečně vstupuje do posledního nízkotlakého válce. Z něj vstupuje pára do kondenzátoru. Stroje s trojnásobnou expanzí, stejně jako u strojů s dvojnásobnou expanzí, se dělí do stejných typů, a to na tandemový, woolfický a sdružený. Nejčastěji se používá stroj sdružený, který má stejné výhody jako sdružený stroj s dvojnásobnou expanzí. Tento typ stroje byl dostatečně výkonný pro pohon zaoceánských lodí [9].



Obr. 2-11 Schéma sdruženého stojatého stroje s trojnásobnou expanzí využívaný k pohonu lodí [12].

## 2.3 Rozvody parních strojů

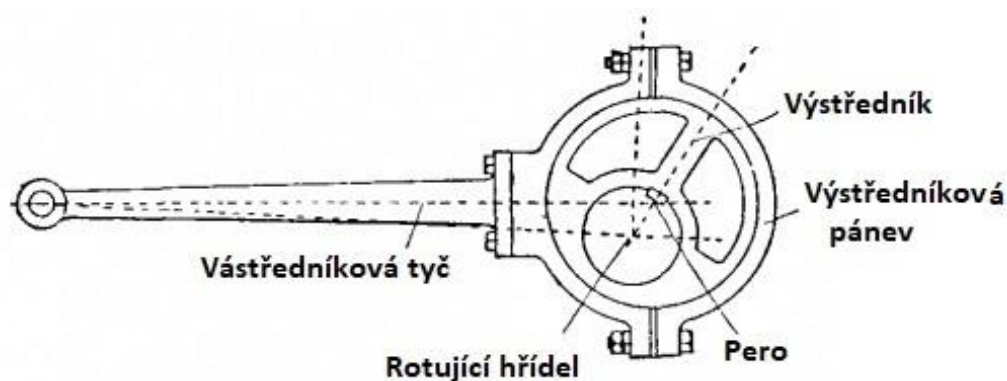
Jednou ze základních částí parních strojů jsou jejich rozvody. Úlohou rozvodů je vpouštět páru do válce ve správný čas a zároveň ji z válce vypouštět. Základní rozdělení rozvodů je na vnitřní a vnější. Vnitřní rozvody mají za úkol zavírat a otevírat parní kanály, kterými proudí pára dovnitř válce. Patří k nim šoupátka a ventily. K vnějším rozvodům patří výstředníky, neokrouhlé kotouče a vačky. Jejich pohyb je zprostředkován pomocí klikové hřídele [9].

Pro správné rozvádění páry jsou kladeny různé požadavky. Otvory, kterými pára proudí, musí mít správný průměr. Zmenšíme-li průměr otvoru, zvětší se rychlost proudění páry a zároveň se sníží tlak, který nám přímo působí na změnu práce stroje. Proto je nezbytné, aby ztráta tlaku byla co nejmenší. Dalším důležitým požadavkem je možnost změny plnění, které se musí měnit se změnou výkonu stroje. Plněním rozumíme poměr celkového objemu válce a objemu v okamžiku uzavření ventilu s přívodem páry. Plnění se musí měnit v mezích minimálního plnění, které je takové, aby se stroj nerozběhl při běhu na prázdko nad dovolené otáčky, a maximálního plnění, které je při nejvyšším zatížení stroje. Důležitou podmínkou je, aby šoupátka nebo ventily byly těsné i za ohřátého stavu, k čemuž může napomoci zvolení vhodného materiálu, tepelná úprava a opracování. Síla potřebná na pohyb rozvodů musí být co nejmenší, aby neklesla účinnost a nerostlo opotřebení rozvodových součástí [9].

Konstrukční řešení rozvodů můžeme dělit do dvou základních skupin, na rozvody šoupátkové a na rozvody ventilové. Jednotlivé řešení jsou popsány níže.

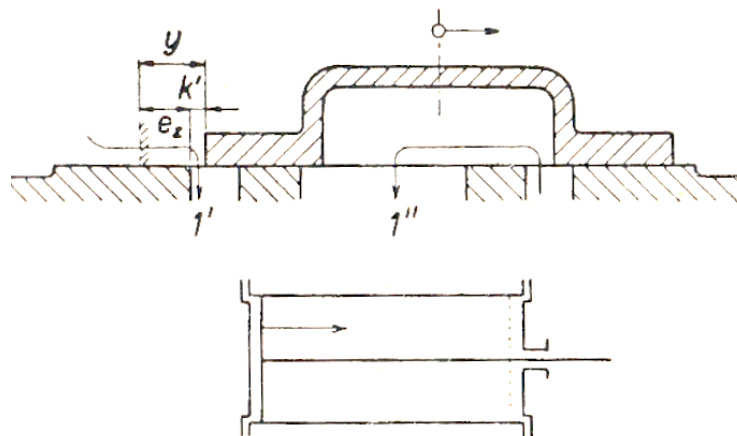
### 2.3.1 Jednoduché ploché šoupátko

Šoupátko se pohybuje v šoupátkové komoře po rovinném sedle, do něhož ústí parní kanály, mezi kterými je výfukový kanál. Šoupátko se pohybuje pomocí výstředníku, na kterém je nasunuta výstředníková tyč, jejíž konec pohání šoupátkovou tyč. Výstředník je pomocí pera nebo klínu zajištěn na klikové hřídeli ke klice pod určitým úhlem, který se získá pomocí rozvodového diagramu. Šoupátko pak vykonává oscilační pohyb, který je fázově posunut oproti pohybu pístu [14]. Nevýhodou je, že na ploché šoupátko působí velký tlak páry, který způsobuje značné tření v šoupátkovém sedle a velkou spotřebu síly na pohon šoupátka [9].



Obr. 2-12 Výstředníkový mechanismus [13]

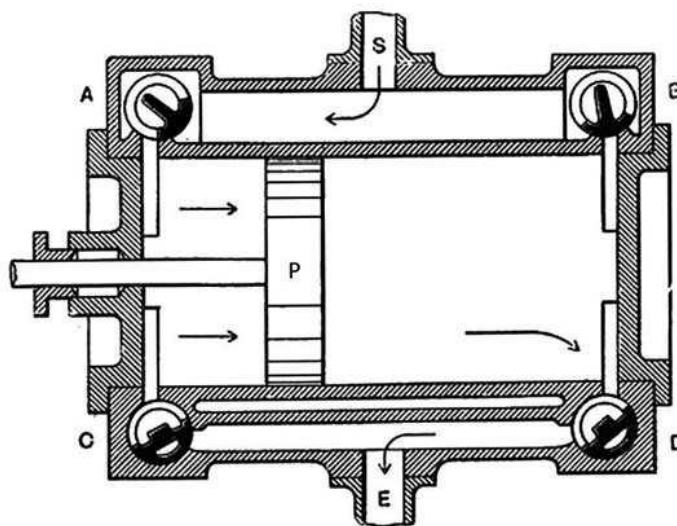
Při pohybu šoupátka ze střední polohy doprava se otevírá zadní parní kanál, do kterého vstupuje čerstvá pára. Pára vstupuje na zadní stranu pístu a tlačí píst vpřed (1. zdvih). Zároveň vyexpandovaná pára z přední strany pístu vstupuje do předního parního kanálu a následně do středního kanálu, který slouží jako výfuk. Při pohybu šoupátka ze střední polohy doleva se směr obrátí a čistá pára vstupuje pravým parním kanálem a vyexpandovaná pára se vyfukuje levým kanálem [9][15].



**Obr. 2-13** Jednoduché ploché šoupátko; Šoupátko je v pravé poloze, levým kanálem se přivádí čerstvá pára (směr 1') a zároveň se vyfukuje vyexpandovaná pára (směr 1'') [9].

### 2.3.2 Corlisova šoupátka

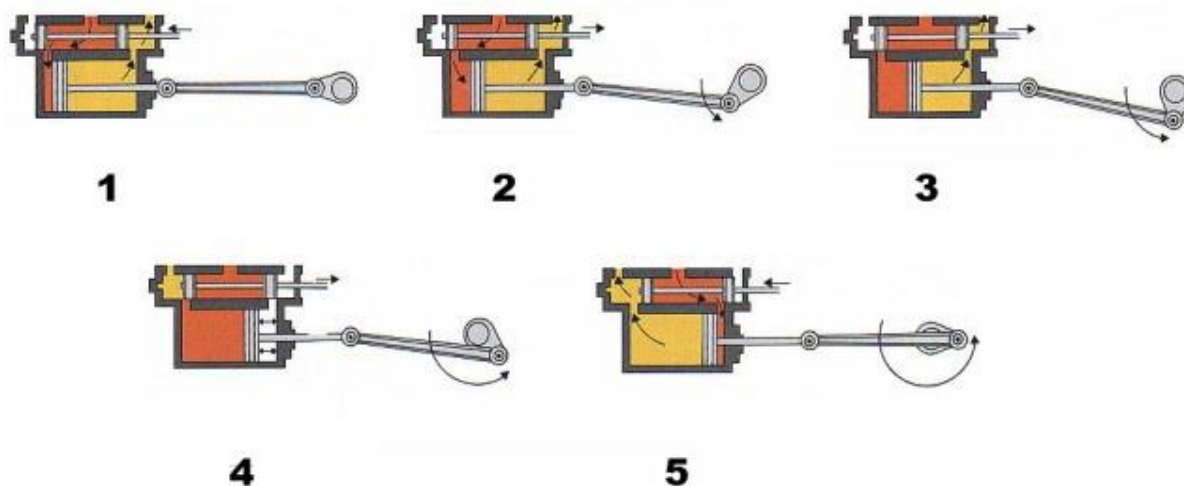
Výhodou těchto šoupátek je, že umožňují vyrobit poměrně malý škodný prostor ve válci. V šoupátkové komoře se obvykle vyskytují čtyři Corlisova šoupátka, to umožňuje dobře ovládat pracovní oběh ve válci. Šoupátka bývají poháněna společným hnacím kotoučem a čtyřmi táhly. Kotouč je poháněn pomocí hlavní hřídele a výstředníku. Tento druh šoupátek je vhodný pouze pro válce, kde je plnění konstantní, jako například u nízkotlakého válce u dvojexpanzních parních strojů. Výroba těchto druhů šoupátek je poměrně složitá a nákladná, proto jsou používána velmi zřídka [16].



**Obr. 2-14** Corlisova šoupátka [17]

### 2.3.3 Pístové šoupátka

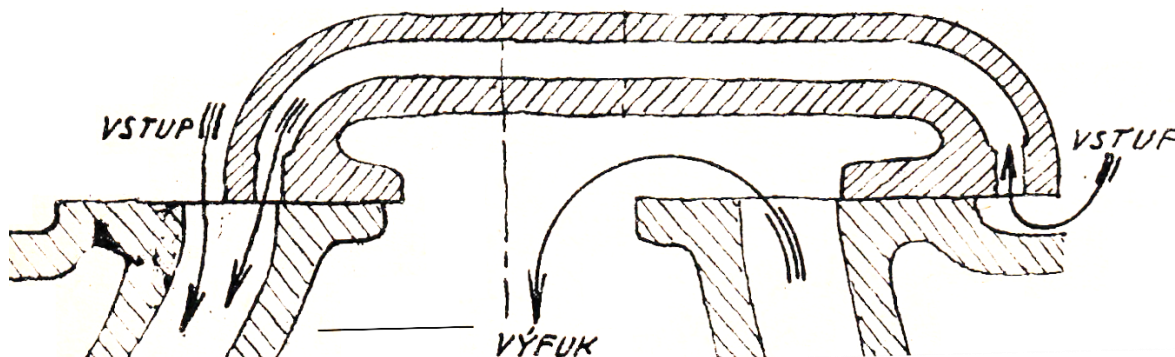
Pístové šoupátka odstraňují nevýhody plochých šoupátek a díky jejich jednoduché konstrukci je najdeme v mnoha rozvodech. Používají se u větších strojů s vyšším tlakem a zdvihem (přes 700 mm). Pára vstupuje do šoupátkové komory, kde se na šoupátkové tyči pohybují dva písty. Pohybem pístů se střídavě uvolňují parní kanály, kterými pára vstupuje do válce a zároveň se vyfukuje vyexpandovaná pára [18]. Časté využití pístového šoupátka najdeme u rozvodů lokomotiv, kde umožňovalo rychlé otevření výfukového kanálu, tím pára rychleji unikala a snižovala zpětný tlak [19].



Obr. 2-15 Pístové šoupátko [19]

### 2.3.4 Trickovo šoupátko

Nazývaná také šoupátka s dvojím vstupem páry. Tato šoupátka obsahují průchozí Trickův kanál, který slouží pro rychlejší odvod páry. Výhodou tohoto šoupátka je dvojnásobně rychlé otevírání a zavírání parních kanálů při plnění a tím i menší škrcení páry a menší výstředník, což má za následek snížení tření mezi sedlem a šoupátkem [9].

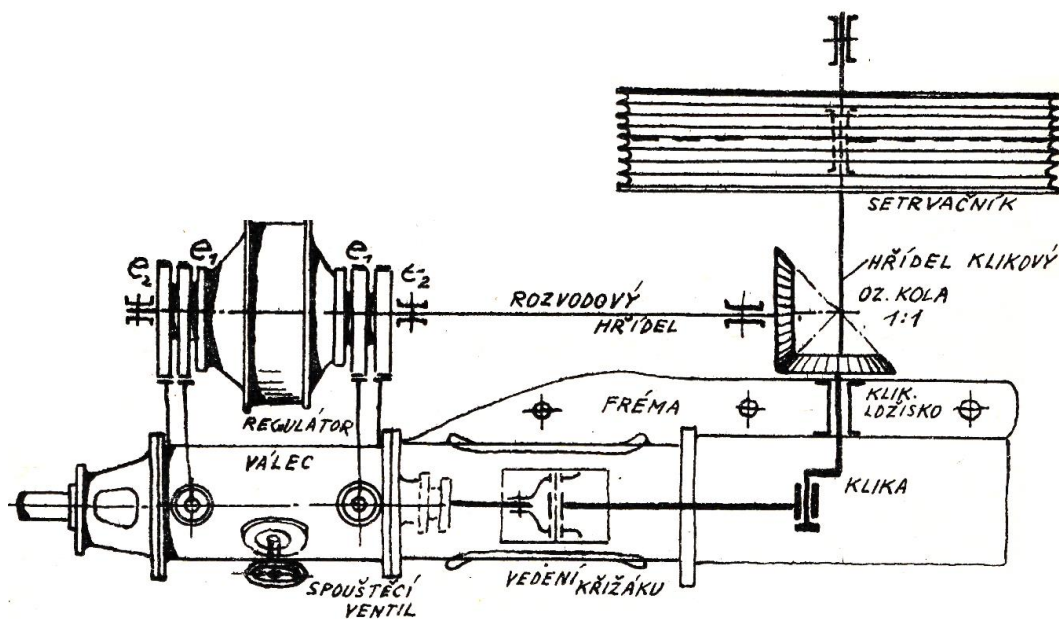


Obr. 2-16 Trickovo šoupátko [16]

### 2.3.5 Ventilové rozvody

Ventily parních strojů fungují na podobném principu, jako u spalovacích motorů. Nejčastěji se u parních strojů využívá odlehčených dvousedlových ventilů. Ventilové rozvody mají tu výhodu, že otevírání a zavírání kanálu se děje velmi rychle, takže pára není škrcena. Umožňují přesnější seřízení pracovního oběhu než šoupátkové rozvody, ale jsou mnohem dražší a staví se zpravidla pro stroje s velkým výkonem. Jelikož jsou ventily hodně odlehčeny, kladou poháněcímu rozvodovému ústrojí malý odpor, to má za následek větší mechanickou účinnost a malé opotřebení. Ve válci bývají obvykle čtyři ventily, dva z nich vpouští páru do válce a jejich zdvih je řízen regulátorem, a zbylé dva ventily jsou vypouštěcí a jsou poháněny výstředníky z rozvodového hřídele rovnoběžného s osou válce [16].

Nevýhodou ventilových rozvodů jsou potíže při vyšších otáčkách. Ventil se musí zastavit dosednutím na sedla, což je doprovázeno větším nebo menším rázem podle konstrukce ventilového rozvodu, proto se ventily hodí převážně pro stroje s menšími otáčkami [9].



Obr. 2-17 Schéma stabilního jednoválcového parního stroje s ventilovým rozvodem [16].

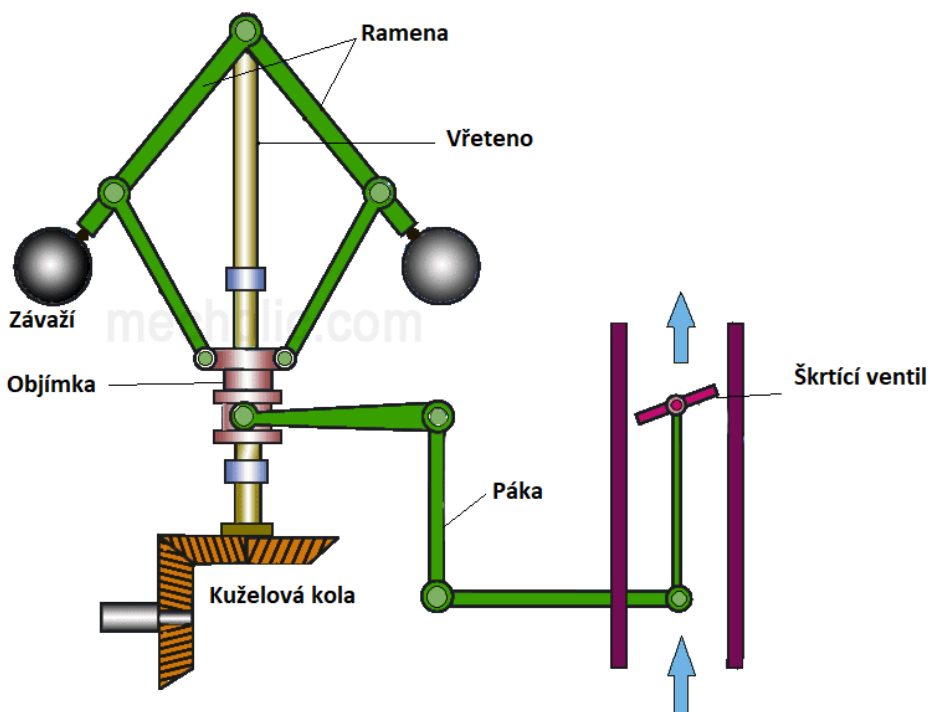
## 2.4 Regulátory

Regulátory parního stroje se rozdělují do mnoha kategorií. Jsou regulátory rychlostní, které mají za úkol udržovat konstantní otáčky stroje při měnícím se zatížení. Regulátory výkonu nám zaručují správný výkon stroje podle okamžité potřeby. Používají se u parních čerpadel a kompresorů, kde se má hmotnostní průtok vody nebo plynu přizpůsobit okamžité spotřebě. Dále se využívají regulátory tlakové nebo teplotní. U parních strojů se nejčastěji využívají regulátory rychlostní, proto se nimi budeme dále zabývat [16].

Pohyb závaží se přenáší na rozvody buď prostřednictvím objímky, to jsou regulátory objímkové, anebo jsou regulátory přímo poháněné hlavním hřídelem stroje, a to jsou regulátory osové nebo také ploché [9].

### 2.4.1 Regulátory objímkové

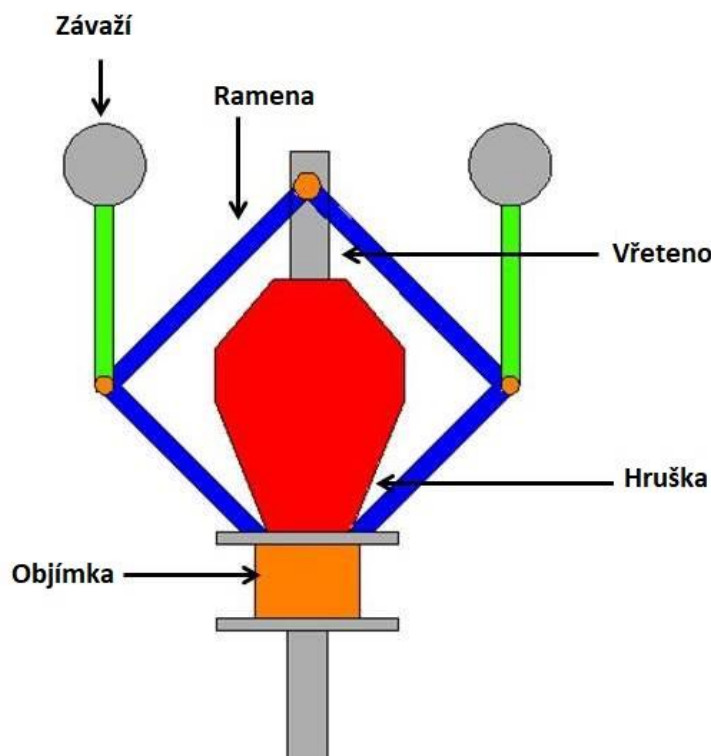
Nejjednodušším objímkovým regulátorem je Wattův odstředivý regulátor, který je zároveň i jeden z nejstarších regulátorů. Tento typ se hodil pouze pro nejmenší výkony parního stroje. Pohon vřetene regulátoru bývá poháněn od hlavního hřídele stroje řemenicí nebo kuželovými koly. Čím rychleji vřeteno rotuje, tím jsou větší odstředivé síly a závaží se vzdaluje od osy vřetena. Zároveň se zvedá objímka, která pomocí páky a táhla otáčí škrťací ventil, který reguluje přívod páry do válce.



Obr. 2-18 Wattův objímkový regulátor [20]

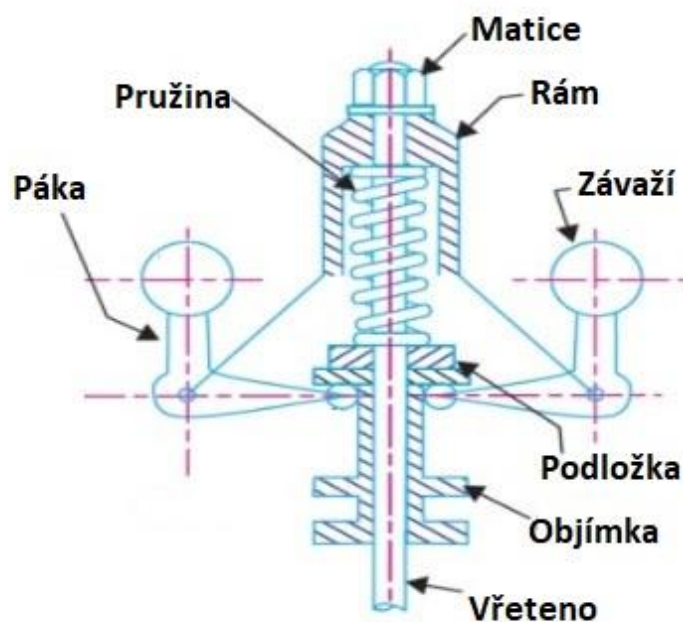


Proellův regulátor pracuje na stejném principu jako Wattův regulátor, avšak s tím rozdílem, že má obrácená závaží. Tím pádem se při zvýšení otáček pohybují závaží směrem dolů, čím je dosaženo lepší regulace. Proellův regulátor obsahuje na objímce hrušku, která zvyšuje mohutnost regulátoru a tím se hodí i na větší výkony parního stroje. Pomocí váhy hrušky se nastavovaly potřebné pracovní otáčky stroje. Mohutnost regulátorů je součin zatěžující síly a příslušného zdvihu objímky. Slouží k návrhu regulátoru podle výkonu a druhu stroje [9].



Obr. 2-19 Proellův regulátor [21]

Pro větší výkony parních strojů bylo nutno použít mohutnější regulátory, které jsou schopny vyvinout značné síly při malé váze a rychlém průběhu regulace. Těmto požadavkům vyhovují pružinové regulátory. Jedním z pružinových regulátorů je Hartnellův regulátor. Pomocí matice se nastavilo předpětí pružiny, která zvýšila mohutnost regulátoru a tím se i mění požadovaný počet otáček stroje. Zvýšením otáček stroje se závaží pohybuje od osy vřetene a zároveň se páka pohybuje nahoru proti síle pružiny. Tento typ regulátoru je vhodný pro vysoké otáčky stroje [21].



Obr. 2-20 Hartnellův pružinový regulátor [21]

## 2.4.2 Ploché regulátory

Ploché regulátory jsou zcela odlišné od objímkového regulátoru. Tento typ regulátoru se dobře hodí pro vyšší otáčky stroje a má velmi rychlou reakci na změnu otáček, avšak jeho konstrukce je složitější a těžko se vyvažuje. Regulátor je spojen s klikovou hřídelí a setrvačnickem a regulace probíhá pomocí odstředivé a setrvačné síly [21].

Regulátory disponují tažnými pružinami, které táhnou páky se závažím směrem ke hřídeli. Druhý konec páky je spojen s výstředníkem. Zvyšují-li se otáčky stroje, zůstává kotouč následkem setrvačnosti pozadu. Kotouč působí tedy na závaží setrvačnou silou a zároveň působí závaží na kotouč silou odstředivou a pružina svou silou. U Proleova plochého regulátoru slouží páka zároveň jako závaží. U tohoto typu regulátorů je možno měnit počet otáček stroje napínáním nebo povolováním pružiny [16].



## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 3.1 Analýza problému

Během vývoje parního stroje byla vyvinuta řada konstrukčních řešení, které se postupem času dále vyvíjely. Řešení se lišila hlavně svojí konstrukcí, výkonem a použitím stroje. Pro pohony parníků nebo elektráren se nejvíce uplatní parní stroj s dělenou expanzí z důvodu toho, že má nízkou spotřebu páry a vyšší výkon. Na druhou stranu obyčejný dvojčinný jednoválcový parní stroj má jednodušší a menší konstrukci a společně s kondenzátorem má i vyšší účinnost.

Důležitým prvkem parního stroje jsou jeho rozvody, které nám musí zaručit správný rozvod páry do válce a tím i hladký chod stroje. Důležité je, aby šoupátka, popřípadě ventily, byly co nejlépe načasovány a na jejich konstrukci jsou kladeny vysoké požadavky. Nejjednodušší rozvody jsou pomocí jednoduchého plochého šoupátka, které se pohybuje pomocí výstředníku poháněného hlavní hřídelí stroje. Hlavním problémem tohoto druhu rozvodu je tření šoupátka po rovinném sedle. Šoupátko se vlivem tření rychle opotřebovává, proto se musí co nejlépe mazat. Díky vysokému tlaku a teplotě páry v šoupátkové komoře je náročný přívod maziva a volba maziva samotného.

Jelikož je parní stroj tepelně poháněným strojem, je důležité pro jeho konstrukci zvolit správný způsob přívodu tepla. Základní zdroj tepla se získává pomocí spalování paliv nebo pomocí elektrické energie. Z důvodu toho, že se u spalování pracuje s ohněm, který nemusí vyhovovat každému pracovnímu prostředí a také vypouští do ovzduší škodlivé látky, je alternativou teplo získané z elektrické energie. Pro získání potřebné přehřáté páry pro pohon stroje z elektrické energie je potřeba dostatečně výkonný zdroj. Výkon se odvíjí od množství vody v kotli a potřebného času k získání páry.

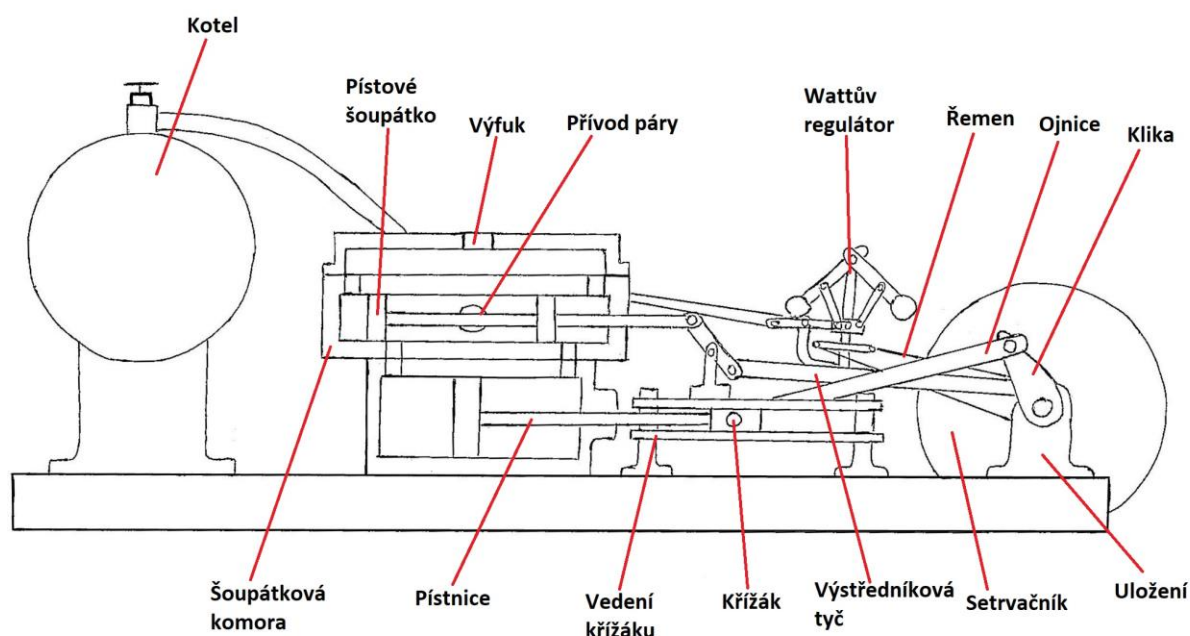
### 3.2 Cíl práce

Cílem práce je zkonstruovat funkční model jednoválcového statického parního stroje poháněného vnějším zdrojem tepla. Model stroje by měl sloužit jako vzdělávací pomůcka. Celkové rozměry by neměly přesáhnout 300 x 400 x 300 mm (délka x šířka x výška) a maximální možná hmotnost stroje je 15 kg.

## 4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Parní stroj je komplexní zařízení, které se skládá z mnoha součástí a mechanismů. Snahou bude najít takové řešení, aby výroba a následná montáž byla co nejjednodušší a aby zvolené materiály byly cenově dostupné a snadno k dostání. Jelikož stroj má sloužit jako model, a tím pádem na výkonu stroje nezáleží, nebude snahou používat vysokopevnostní materiály. Základním prvkem, ze kterého se vychází, jsou celkové rozměry stroje. Stroj musí být také jednoválcový, což nám usnadňuje jeho konstrukci. Na těchto základech, společně s rešeršní částí, jsou vypracovány tři koncepční řešení, které jsou v této kapitole popsány.

### 4.1 Parní stroj s pístovým šoupátkem a s otevřeným vedením křížáku



Obr. 4-1 Koncepční řešení parního stroje s pístovým šoupátkem a s otevřeným vedením křížáku.

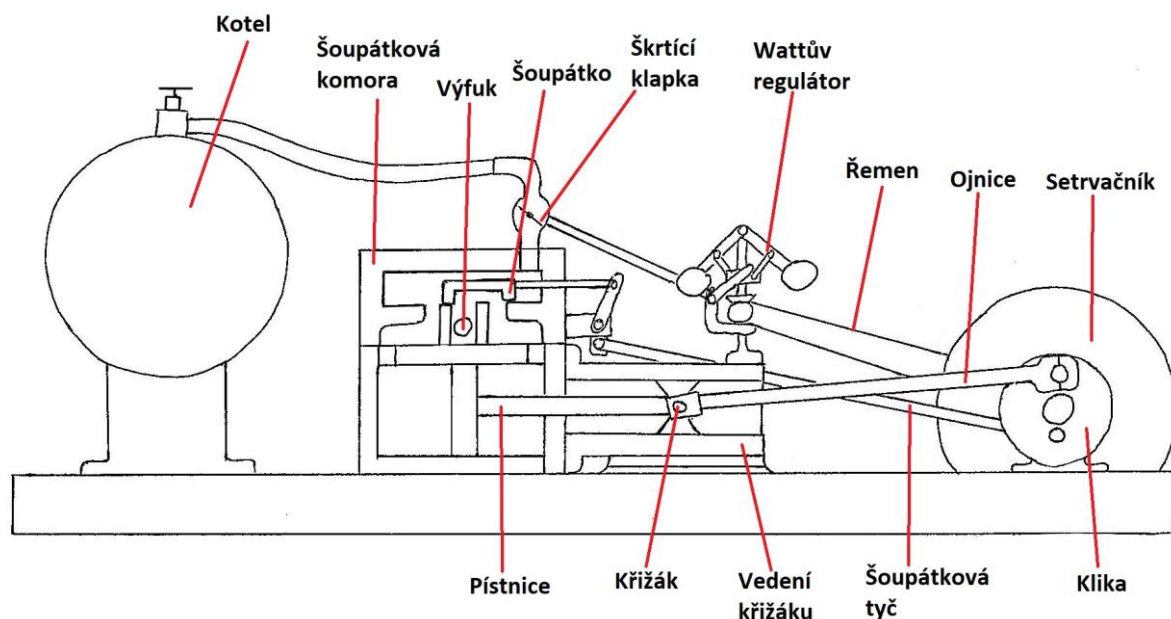
U prvního koncepčního řešení, které je schematicky popsáno na obr. 4-1, slouží pro správný rozvod páry pístové šoupátko. Tento druh rozvodů má výhodu v tom, že je konstrukčně velmi jednoduchý. Hlavní nevýhodou pístového šoupátka je, že potřebuje větší zdvih než ostatní druhy rozvodů. Proto je stroj opatřen pákou, která zvětšuje zdvih a tím pádem není potřeba velký výstředník. Výstředník je poháněn od hlavního hřídele, na kterém je umístěn setrvačnick, klika a řemenice.

Klika je nalisována na konci hlavního hřídele. Konec kliky obsahuje ojnicí čep, který pomocí ojnice a křížáku přemění translační pohyb na pohyb rotační. Křížák se pohybuje v otevřeném vedení. Hlavní výhodou tohoto vedení je, že pohyb ojnice není omezen délkou vedení, proto může být ojnice výrazně kratší. Křížák je pevně spojený s pístnicí, která je poháněná tlakem páry působící na píst.

Jako regulační člen je zde Wattův odstředivý regulátor, jehož princip je popsán v kapitole 2.4.1. Regulátor je poháněný pomocí řemenu, jehož řemenice je umístěna na hlavní hřídeli stroje. Objímka, která se zvyšujícími otáčkami stoupá, otáčí pomocí páky škrťací ventil, který reguluje přívod páry do šoupátkové komory.

Jedna z nevýhod tohoto koncepčního řešení je umístění šoupátkové komory. Protože je komora umístěna na horní straně válce, je pístnice ve stejné rovině jako pístnice šoupátka. Proto nemůžeme pohánět šoupátko přímo výstředníkovou tyčí, což vyžaduje složitější konstrukci.

## 4.2 Parní stroj s plochým šoupátkem a s uzavřeným vedením křížáku



Obr. 4-2 Koncepční řešení parního stroje s plochým šoupátkem a s uzavřeným vedením křížáku.

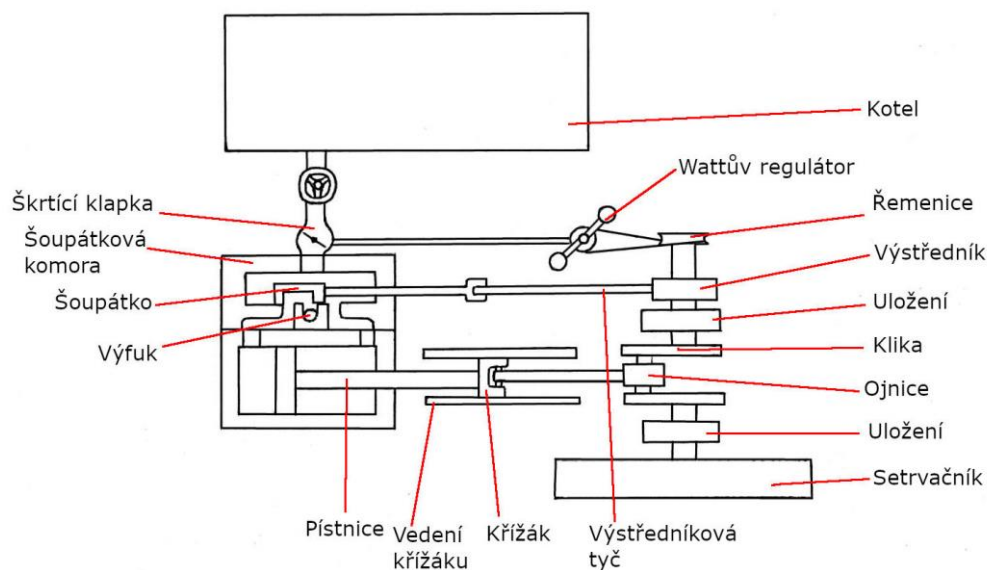
Pro druhé koncepční řešení, zobrazené na obr. 4-2, je zvolen rozvod páry pomocí jednoduchého plochého šoupátka. U plochých šoupátek není potřeba velký zdvih, díky tomu může šoupátková komora a výstředník disponovat menším rozměrem. Nevýhodou těchto druhů rozvodů je složitější konstrukce šoupátkové komory, a také je potřeba dosáhnout co nejmenšího tření mezi rovinným sedlem šoupátkové komory a šoupátkem samotným. Šoupátko je poháněno od klikové hřídele šoupátkovou tyčí a soustavou pák pro správnou délku zdvihu. Není zde použit klasický výstředník, který je popsán v kapitole 2.3.1, ale jen kliková hřídel.

Pro snazší výrobu je kliková hřídel vyrobena bez protizávaží. Kliková hřídel má dvě kliky, které jsou vůči sobě pootočené tak, aby bylo dosaženo správného rozvodu páry. První klika slouží k pohonu šoupátka a druhá k přeměně translačního pohybu z pístu na pohyb rotační.

Křížák se pohybuje v uzavřeném vedení, což má za nevýhodu omezenou délku ojnice. Ojnice musí být delší, protože hrozí riziko nárazu do horní roviny vedení křížáku. Regulace probíhá pomocí Wattova odstředivého regulátoru, který je poháněn řemenem od klikové hřídele. Svislá řemenice na regulátoru převádí rotační pohyb pomocí ozubeného soukolí na osu regulátoru, který pak pomocí objímky a pákového mechanismu reguluje škrťací klapku.

Hlavní nevýhoda tohoto řešení je stejná jako u prvního koncepčního řešení, a to umístění šoupátkové komory. Nelze tak pohánět šoupátko přímo šoupátkovou tyčí, ale musíme použít další mechanismy, které dělají konstrukci složitější.

#### 4.3 Parní stroj s plochým šoupátkem a bočním uložením komory



**Obr. 4-3** Koncepční řešení parního stroje s plochým šoupátkem s bočním uložením komory.

Poslední řešení, zobrazené na obr. 4-3, odstraňuje hlavní nevýhody dvou předchozích koncepčních řešení. Pro rozvod je zde zvoleno jednoduché ploché šoupátko, jehož šoupátková komora je umístěna na boku válce. To nám umožňuje pohánět šoupátko přímo výstředníkovou tyčí a není zde potřeba žádných přídavných mechanismů. Výstředník je poháněný klikovou hřídelí, která je uložena v hlavním rámu. Kliková hřídel má pouze jednu kliku.

Křížák se pohybuje v otevřeném vedení, což umožňuje použití kratší ojnice. Tím se dosáhne menší velikosti stroje. Regulace je zde řešena obdobně jako u předchozích dvou řešení, a to pomocí Wattova regulátoru poháněného řemenem od klikové hřídele.

## 4.4 Celkové zhodnocení

Koncept parního stroje s otevřeným vedením křížáku a pístovým šoupátkem má hlavní nevýhodu v uložení šoupátkové komory. Toto uložení by komplikovalo celkovou výrobu. Další nevýhodou je pístové šoupátko, které nemůže být přímo poháněno od výstředníku, protože potřebuje velký zdvih. Naopak jeho výhodou je jednodušší konstrukce pístového šoupátka a klikové hřídele, která má jen jednu část kliky.

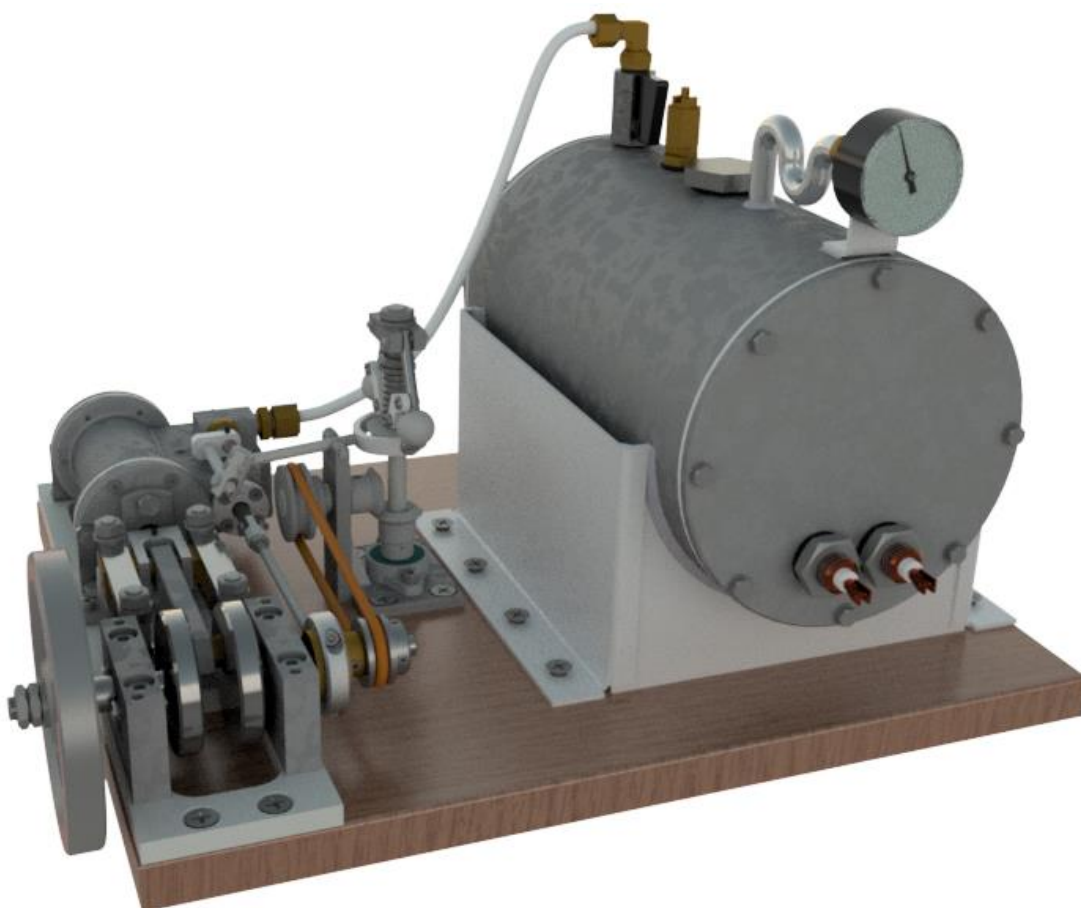
Koncept stroje s uzavřeným vedením a s plochým šoupátkem má stejnou nevýhodu jako předchozí koncept, a to uložení šoupátkové komory. Mezi další nevýhody patří uzavřené vedení křížáku, kvůli kterého musí mít celkový stroj větší délku z důvodu možného nárazu ojnice do horní roviny vedení. Jeho výhodou je absence výstředníku díky druhé klice na klikové hřídeli.

Parní stroj s plochým šoupátkem, bočním uložením komory a s otevřeným vedením křížáku nemá téměř žádné nevýhody. Má jednoduchou konstrukci, snadnou údržbu, nízký nárok na kvalitu materiálů, snadnou výrobu součástí a jejich montáž. Z těchto důvodů se této koncepci budeme dále zabírat v konstrukčním řešení.

## 5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Koncepční řešení parního stroje s plochým šoupátkem, bočním uložením komory a otevřeným vedením křížáku, popsáno v kapitole 4.3, bylo po důkladné analýze zvoleno jako nejvhodnější. V následujícím textu je koncept rozveden do konstrukčního řešení. K tvorbě modelu stroje a výkresové dokumentace je využita aplikace Inventor.

Stroj se skládá ze tří základních částí, a to ze samotného parního stroje, kotle a regulátoru. V kotli pomocí topné spirály vzniká sytá pára, která je vedena hadicí skrz ventil a škrťací klapku do šoupátkové komory, kde je následně pára rozvedena do válce. Pára tlačí do válce, který se posouvá přímočarým pohybem. Ten se pomocí úplného klikového mechanismu transformuje na rotační pohyb. Na klikové hřídeli je umístěn setrvačnick a také řemenice, která pomocí kruhového řemenu pohání regulátor. Ten podle otáček stroje pootáčí škrťací klapkou a tím reguluje přívod páry do válce. Na klikové hřídeli je také umístěn výstředník, který slouží k pohonu šoupátka. Na obrázku 5-1 je znázorněno celkové konstrukční řešení stroje. Dále se práce bude zabývat detailně jednotlivými částmi stroje.



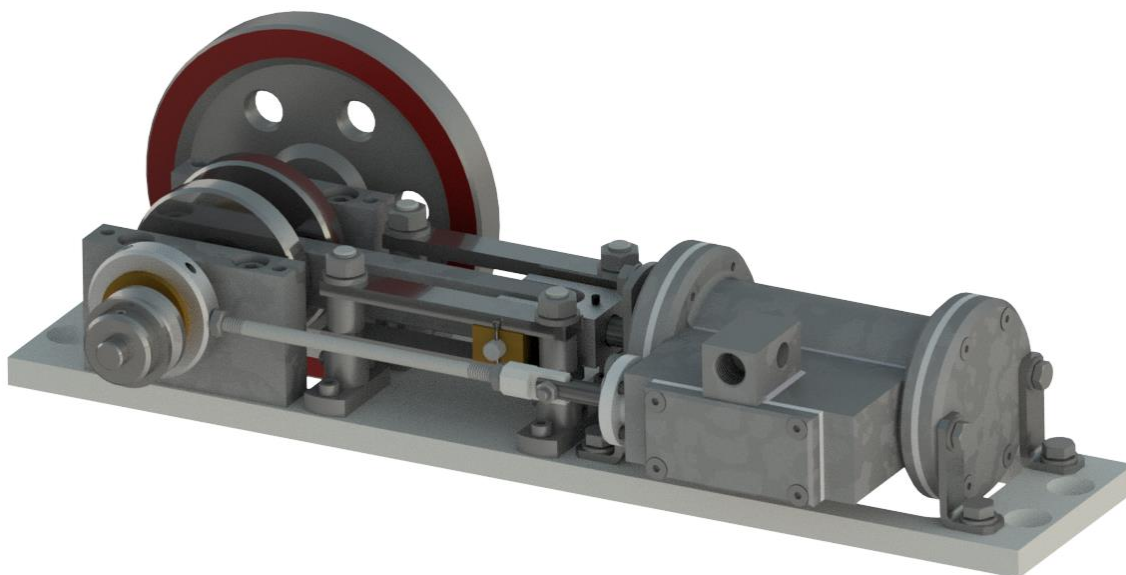
Obr. 5-1 Konstrukční řešení parního stroje



## 5.1 Popis konstrukčního řešení parního stroje

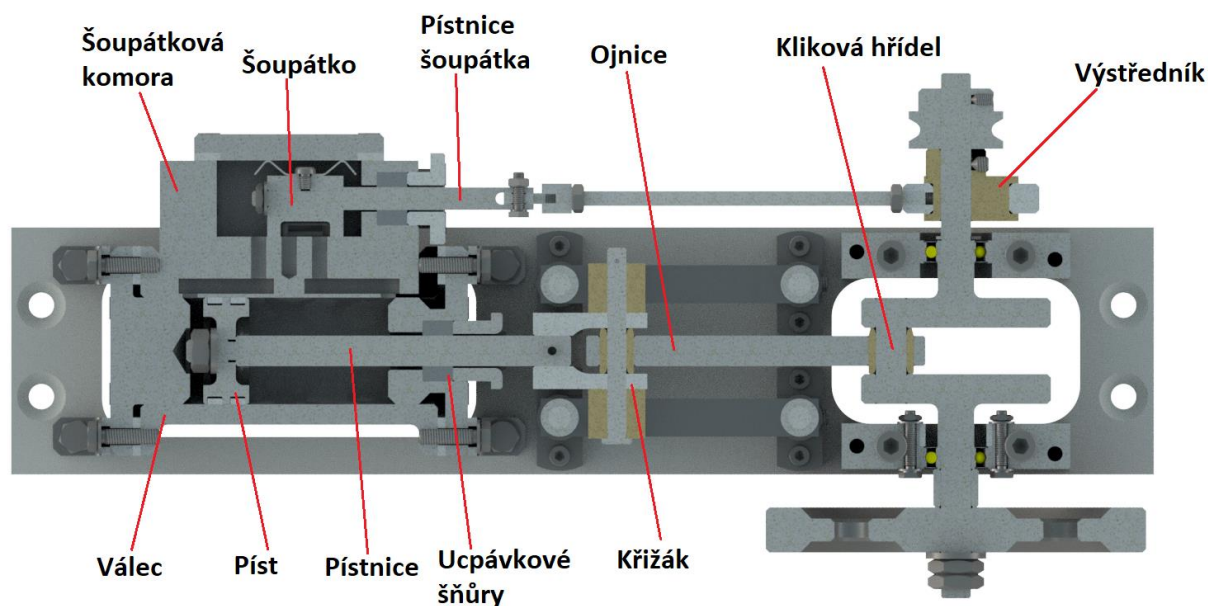
Samotný parní stroj, zobrazený na obrázku 5-2, je jedna z nejdůležitějších částí celkového stroje. Je zde uskutečněna veškerá práce stroje.

Jedna z hlavních částí stroje je válec. Ten je vytvořený z hliníkové trubky, a jeho povrch je eloxován do hloubky 5  $\mu\text{m}$ . Eloxování je zde použito za účelem zlepšení celkového vzhledu stroje a také ke zlepšení korozní odolnosti. Vnitřní plocha válce musí mít hladký a přesný povrch. Kvůli nízké drsnosti vnitřního povrchu válce nebude stačit klasické třískové obrábění, proto se použije přesnější obrábění, jako například honování nebo superfinišování. Válec je těsněný pomocí silikonového přírubového těsnění, které je vhodné do vyšších teplot. Těsnění je k válci připevněno bočními víky, která jsou spojena zápusťnými šrouby k válci. Obě víka jsou také z hliníku, který se eloxuje.



Obr. 5-2 Samotný parní stroj

Ve válci se pohybuje píst, který je vyroben z nerezové tyče. Pístní kroužky jsou vyrobeny z polyamidu, který je ideální pro vyšší teploty. Píst je připevněn k nerezové pístnici pomocí matice a podložky, jak je to znázorněné na obrázku řezu samotného stroje 5-3. Z důvodu vyčnívající matice z pístu je ve víku z bezpečnostního hlediska vyvrtán malý otvor. To by mělo zabránit nárazu pístu do válce při případných výrobních nepřesnostech. Tento otvor také mírně zvyšuje objem škodného prostoru, ale s přihlédnutím na velikost otvoru by zvětšení škodného prostoru nemělo mít vliv na výkon ani funkčnost stroje. Pístnice je těsněna pletenou ucpávkovou šňůrou s PTFE vlákny, která je speciálně navržena na cyklicky pracující parní a tepelná zařízení. Ucpávková šňůra je stlačena pomocí ucpávkového víka, které se dá koupit.



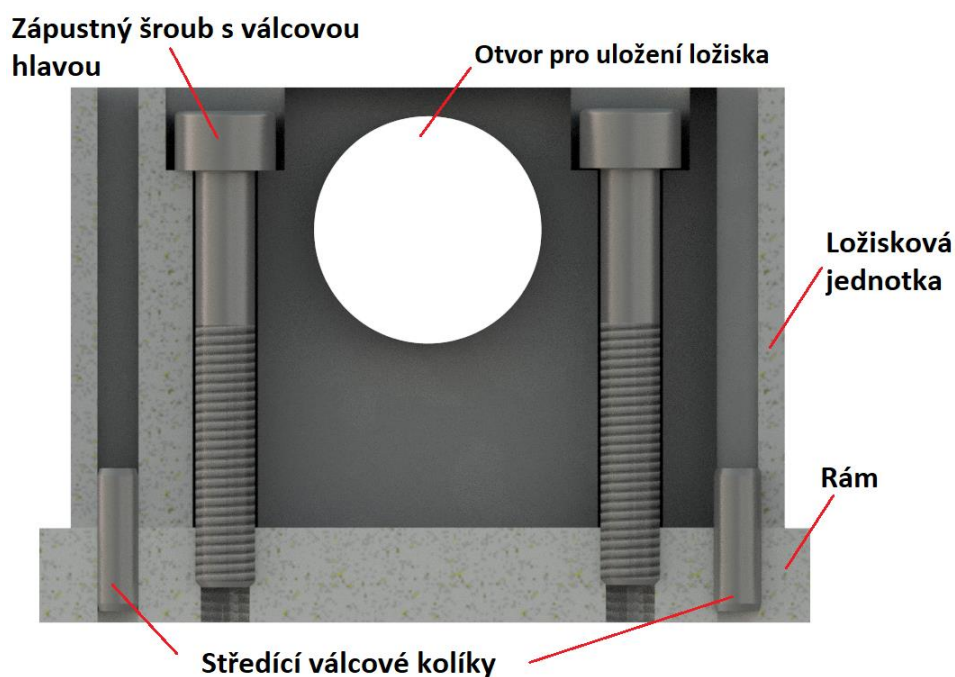
Obr. 5-3 Řez samotným parním strojem.

K pístnici je připojen křížák pomocí kuželového kolíku. Díra pro kolík se musí vrtat až při montáži, aby byla zajištěna souosost děr a také správná vzdálenost mezi pístem a křížákem. Křížák má dva kluzné vodící bloky ze slitiny mosazi. Je to kvůli tomu, že mosaz má dobré kluzné vlastnosti a dobrou odolnost proti opotřebení při větší zátěži. Tyto bloky se pohybují po vedení, která jsou z broušené oceli. Pro co nejlepší kluzné vlastnosti a pro snížení opotřebení by se plochy vedení měly mazat. Pro tyto účely je dostačující použít univerzální mazivo jako například WD-40 nebo stejné mazivo jako u válce. Bloky jsou spojeny s křížákem pomocí čepu, který je zajištěn závlačkou. Na čepu je také umístěna ojnice.

Na ojnici jsou nalisována kluzná pouzdra ze slitiny mědi. Ojnice spojuje křížák s klikovou hřídelí. Ta je vyráběna jako dvoudílná a jednotlivé části kliky jsou pak spojeny nalisováním na ojnicí čep. Je to proto, aby se co nejvíce usnadnila výroba kliky a tím i snížila cena. Dvoudílná kliková hřídel má i tu výhodu, že se zjednoduší výroba ojnice, která v tomto případě nemusí být složena z více částí. Při lisování ojnicího čepu je už ojnice na tento čep nasazena a pouze se dolisuje druhá část kliky. Co se týká vyvážení klikové hřídele, tak v tomto konkrétním případě tomu není nutno věnovat velkou pozornost. Stroj slouží jako model, nejsou zde velké otáčky a ani velké setrvačné síly.

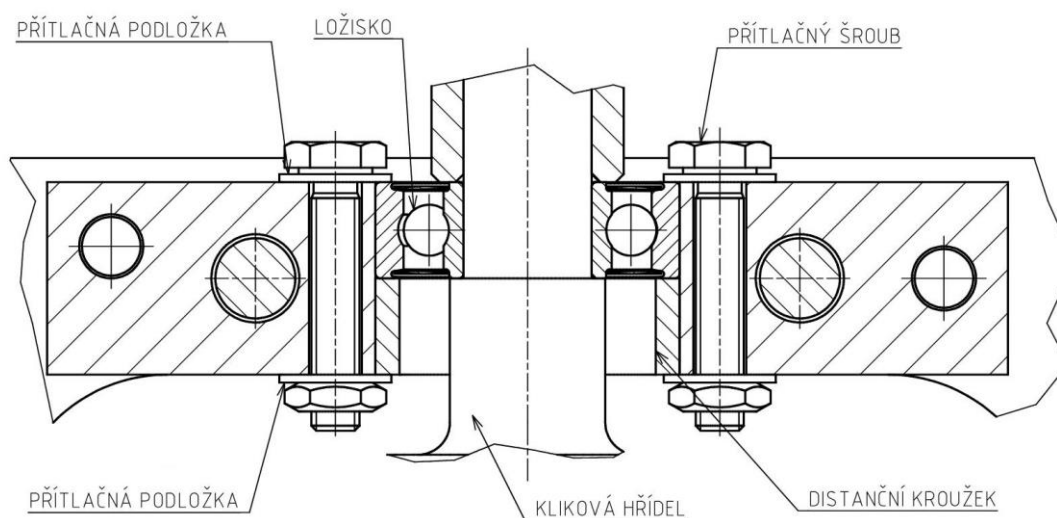
Kliková hřídel je uložena v ložiskových jednotkách. Jelikož je slisovaná kliková hřídel příliš dlouhá, nastává zde problém, jak hřídel uložit a zajistit souosost dvou protilehlých ložisek. To je zde řešeno tím, že ložisková jednotka se připevní šrouby k rámu, následně se vyvrtají otvory 19 mm pro uložení ložisek. Aby byla zajištěna souosost i po opětovné montáži, jsou do ložiskové jednotky a rámu navrtány otvory pro středící kolíky, tak jak je to na obrázku 5-4. Po vyvrtání děr pro kolíky a uložení ložisek se jedna ložisková jednotka odmontuje a vloží se do obou děr kliková hřídel. Následně se pomocí kolíků a šroubů zase zpátky namontuje ložisková jednotka.





**Obr. 5-4** Uložení ložiskové jednotky do rámu.

V ložiskových jednotkách jsou umístěny ložiska SKF W 619/8-2RS1, která už obsahují trvalé mazivo, tím pádem se nemusejí mazat. Vodicí ložisko je v jednotce uloženo pomocí přítlačných šroubů a matic, jak je to znázorněno na obrázku 5-5. Tento způsob uložení umožňuje zjednodušit výrobu, zlepšit přesnost, ušetřit místo a snížit cenu celkové konstrukce. Axiální posuv je zde zajištěn podložkami a distančním kroužkem, který musí být vyroben do kladné tolerance, aby byl zajištěn dotyk podložky a distančního kroužku. Volné ložisko je zajištěno pouze pojistným kroužkem pro hřídele.



**Obr. 5-5** Uložení vodicího ložiska

### 5.1.1 Konstrukce rozvodu páry do válce

Na klikové hřídeli je umístěn výstředník, který pohání šoupátko, a tím rozvádí páru do válce. Princip fungování plochého šoupátka je popsán v kapitole 2.3.1. V tomto případě má zdvih šoupátka 8 mm, proto musí být výstřednost 4 mm. Důležité je, aby byl výstředník správně pootočen vzhledem ke klice. Toto nastavení by se mělo dělat při montáži, kde se sleduje poloha šoupátka a kliky. Důležité je také, aby výstředník byl v rovině s pístnicí, která pohání šoupátko. Poloha správně pootočeného a posunutého výstředníku se zajistí na klikové hřídeli pomocí stavěcího šroubu. Celkový postup seřízení je popsán v kapitole 6-2.

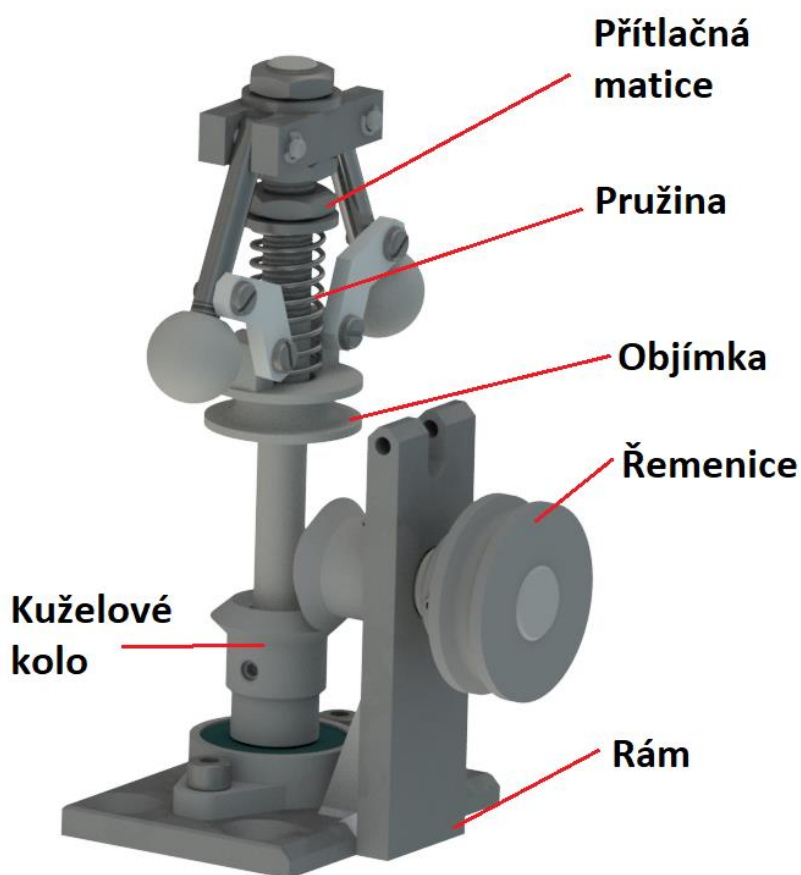


Obr. 5-6 Výstředníkový mechanismus

Kloub na výstředníku se pomocí šroubu a matice spojí s nerezovou pístnicí od šoupátka. Šoupátko je z nerezové oceli a na vrchní části je umístěna plochá pružina. Je důležité, aby pružina měla dostatečnou tuhost, aby zabránila páře nadzdvihovat šoupátko. Stěny šoupátkové komory a rovinné sedlo, po kterém se šoupátko pohybuje, se mažou pomocí tuhého maziva, které zabraňuje otěru a zadření. Těsnění pístnice šoupátka je navrženo obdobně jako u klasické pístnice válce, je zde použita pletená ucpávková šňůra. Víko komory je těsněné pomocí silikonového obdélníkového těsnění. Celá šoupátková komora včetně víka je stejně jako válec z eloxovaného hliníku. Řez šoupátkovou komorou je znázorněn na obrázku 5-3. K válci je připájena šoupátková komora, pájení je zde pomocí hliníkové tvrdé pájky AlSi12, která je nejvíce vhodná pro pájení zvoleného typu hliníku.

## 5.2 Regulace

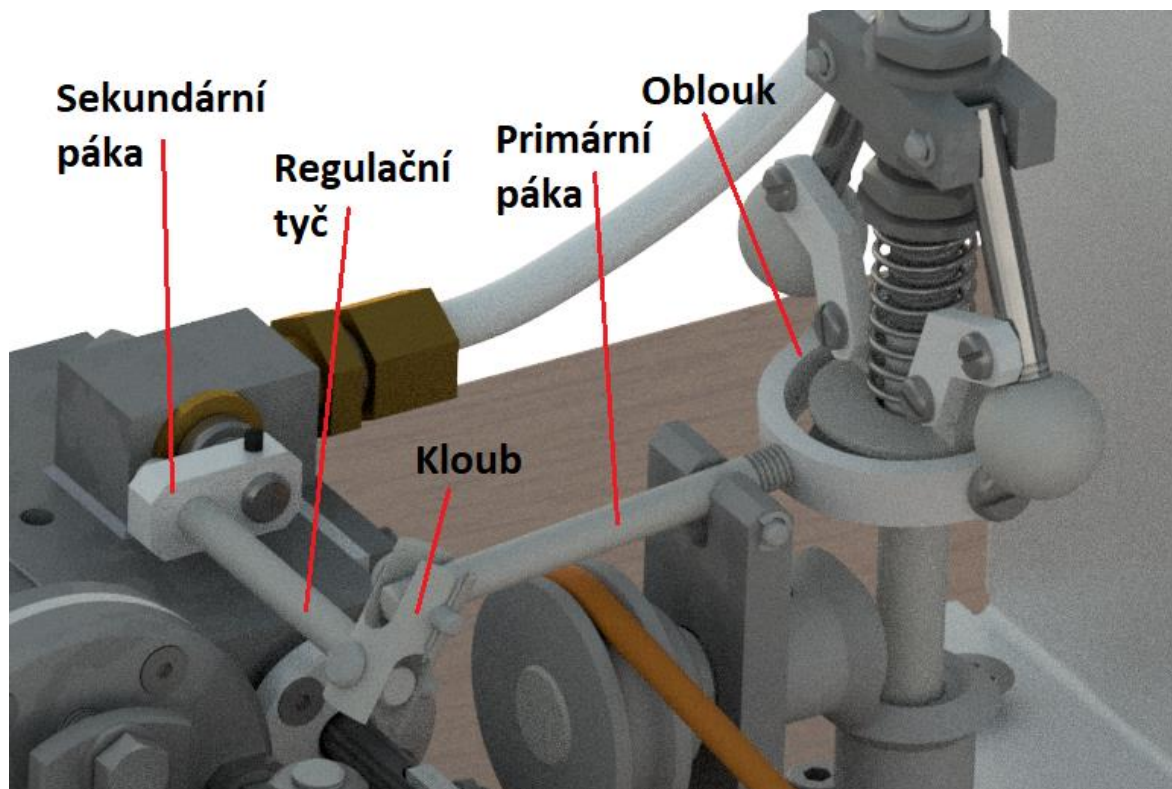
Na klikové hřídeli je umístěna řemenice, která pomocí kruhového řemene z polyuretanu pohání Wattův odstředivý regulátor. Princip regulátoru je popsán v kapitole 2.4.1. Řemenice na klikové hřídeli má roztečný průměr 23 mm a řemenice na regulátoru má roztečný průměr 30 mm, z toho plyne, že nastává převod dopomala, konkrétně s převodovým poměrem 1,3. Řemenice regulátoru je zajištěna proti axiálnímu posuvu na hřídeli stavěcím šroubem. Hřídel je uložena v ložiskovém pouzdře, které je nalisováno v rámu. Na hřídeli je také umístěno kuželové ozubené kolo, které je zde upevněno stavěcím šroubem. Druhé ozubené kolo, o stejné velikosti jako to hnací, pohání hlavní hřídel regulátoru, ten je uložen v zakoupené ložiskové jednotce.



Obr. 5-7 Regulátor

Rám je vyroben z hliníku a je připájen stejnou pájkou jako válec s komorou. K rámu je připájeno žebro, které by mělo zajistit kolmost stěn a také zvětšit tuhost rámu. Celková mohutnost regulátoru, a tím i požadovaný počet otáček, se zde seřizuje pomocí pružiny a přítlačné matice. Detailní popis funkce pružiny je popsán v kapitole 2.4.1.

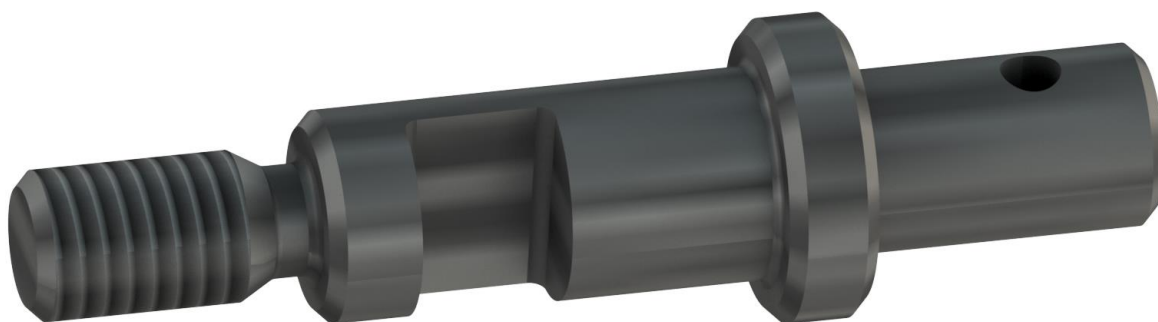
Pomocí pákového mechanismu, znázorněném na obrázku 5-10, je přímočarý pohyb objímky přeměněn na pohyb, který pootáčí škrťací klapkou. Primární páka je upevněna pomocí čepu s pojistným kroužkem do rámu regulátoru a pomocí oblouku pohybuje s kloubem, který je na opačném konci páky než oblouk. Výhoda páky je v tom, že dokáže přeměnit krátký pohyb objímky na relativně dlouhý pohyb škrťací klapky. Kloub spojuje primární páku a regulační tyč pomocí čepů se závlačkou. Regulační tyč je volně zasunuta do sekundární páky, kde není nijak zajištěna. Sekundární páka je pomocí kolíku spojena se škrťací klapkou, kterou celý pákový mechanismus pohybuje. Tato konstrukce regulace má tu výhodu, že není nijak citlivá na výrobní nepřesnosti, a vždy je zaručena správná regulace.



Obr. 5-8 Pákový mechanismus

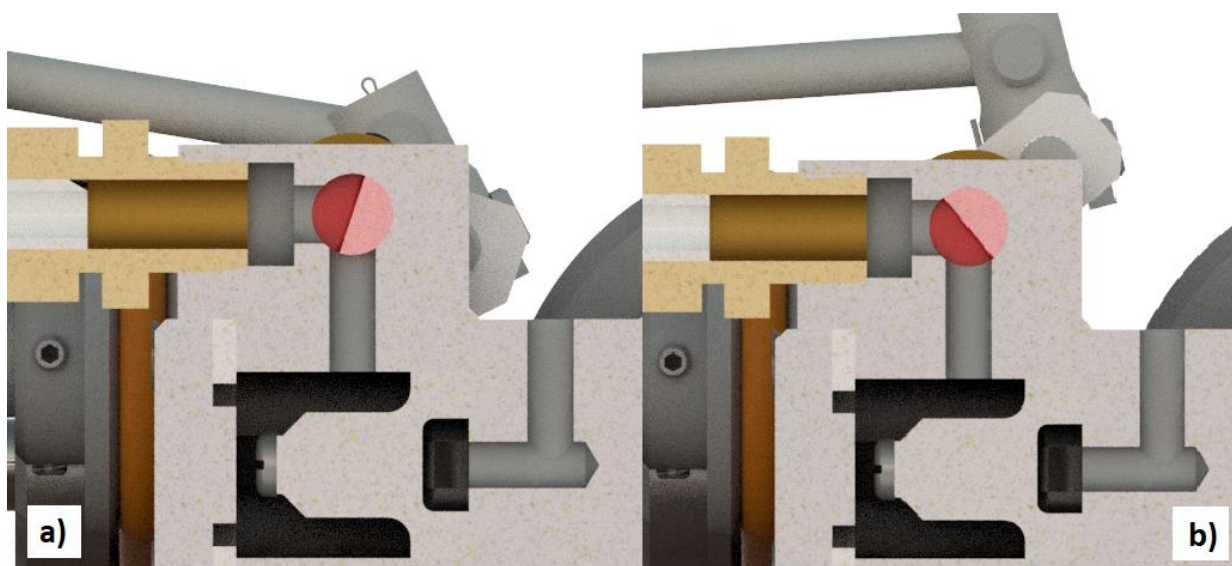
### 5.2.1 Škrťací klapka

Škrťací klapka, která je samostatně zobrazena na obrázku 5-11, je vyrobena z nerezové oceli. Je zde vyfrézovaná drážka, která má za úkol uzavírat nebo otevírat vstupní kanál pro páru a tím regulovat celkové otáčky stroje. Otvor pro válcový kolík slouží ke spojení se sekundární pákou. Je zde už předvrtán z výroby proto, aby zajistil správné vzájemné pootočení drážky a sekundární páky. Škrťací klapka je uložena v regulačním členu. Ten je vyroben z eloxovaného hliníku, který je napájen hliníkovou tvrdou pájkou na šoupátkovou komoru.



**Obr. 5-9** Škrťací klapka

Princip škrťací klapky je zobrazen na obrázku 5-12. Když stroj přesáhne dovolené otáčky, objímka regulátoru se odstředivou silou zvedne a pomocí soustav pák, které jsou popsány výše, se škrťací klapka pootočí do částečně zavřené polohy. Klapka je nastavena tak, aby nikdy neuzavřela kanál úplně a pára mohla vždy proudit skrz. Jestliže jsou otáčky příliš malé, objímka zůstává ve své původní poloze a škrťací klapka se plně otevře. K regulačnímu členu je připevněno pneumatické hrdlo, které přivádí páru z kotle pomocí teflonové hadice o vnitřním průměru 4 mm.



**Obr. 5-10** Regulační člen se škrťací klapkou; a) klapka částečně uzavírá kanál; b) klapka plně otevírá kanál.



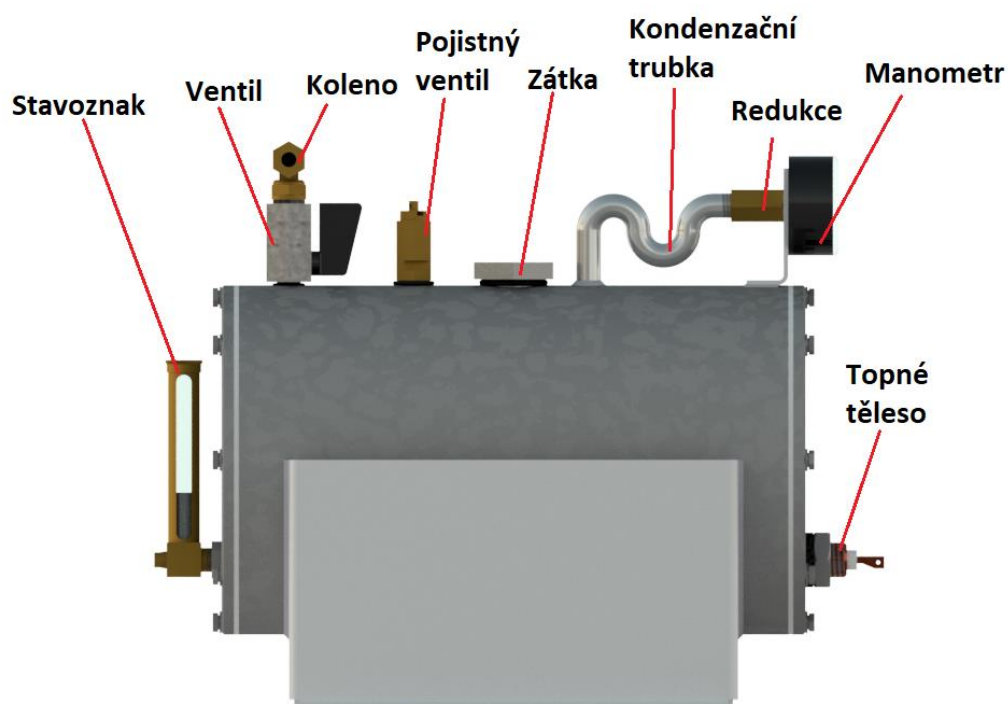
## 5.3 Kotel

Válcová část kotle je vyrobena z tlustostěnné hliníkové trubky o tloušťce stěny 10 mm. Je to hlavně z toho důvodu, aby se víka na bocích mohla jednoduše přišroubovat k boční části trubky. Víka jsou zde přimontována pomocí šroubů se šestihrannou hlavou. Mezi víkem a trubkou je přírubové silikonové těsnění obdobně jako u těsnění válce. Celá konstrukce kotle je uložena v horizontální pozici do rámu. Rám je složen ze čtyř hladkých hliníkových plechů, které jsou vzájemně připájené stejnou hliníkovou pájkou jako u pájení válce a šoupátkové komory. K předním stěnám rámu je také připájen samotný kotel.

Do kotle se voda přivádí skrz vyvrtaný otvor v horní části kotle, který se poté uzavře pomocí zátky a O-kroužku. Pro zjištění správné hladiny vody v kotli je umístěn na boku kotle zakoupený stavoznak. Ten je ke kotli připevněn pomocí trubkového závitu vyřezaného do víka. Pro dostatečné těsnění je na závit aplikováno závitové těsnění ve formě pasty. Dále je také na kotli umístěn kulový ventil, na kterém je přimontováno bronzové pneumatické hrdlo. Do hrdla se připojí hadice, která odvede páru do šoupátkové komory. Pro bezpečnost je zde také zakoupený pojistný ventil, který je našroubován do stěny kotle a je těsněn O-kroužkem.

Maření tlaku v kotli se provádí pomocí manometru, který je umístěn na stojanu z hliníkového plechu připájeného ke stěně válce. Mosazná redukce slouží jako matice pro upevnění manometru do stojanu, ale slouží zde také pro redukci závitu z trubkového na metrický. Redukce spojuje kondenzační trubku, na které je vyřezán metrický závit pomocí závitového očka, s manometrem, který má trubkový závit. Kondenzační trubka je vyrobena z hliníkové trubky o světlosti 6 mm a je připojena k válci pomocí pájení. Pro zajištění úplné těsnosti je mezi závity aplikováno závitové těsnění od firmy Loctite ve formě pasty.

Teplo v kotli se získává pomocí zakoupeného topného tělesa, které má výkon 1500 W a je navrženo na klasické síťové napětí 230 V. Těsnění je zde řešeno pomocí měděných těsnících kroužků, které jsou umístěny na vnitřní straně víka. Z vnitřní strany je topné těleso uchyceno pouze podložkou a maticí.



Obr. 5-11 Konstrukce kotle

## 5.4 Výpočty

V následující kapitole jsou uvedeny výpočty výkonu stroje, spotřeby páry a rychlosti pístu. Tyto výpočty jsou důležité pro zvolení správných rozměrů a materiálu, ze kterých je stroj vyroben. Rozměry hlavních částí jsou navrženy tak, aby polotovar pro jejich výrobu byl snadno dostupný a cenově výhodný a zároveň, aby výroba byla co nejjednodušší.

Výpočty dále vycházejí z navržených hodnot:

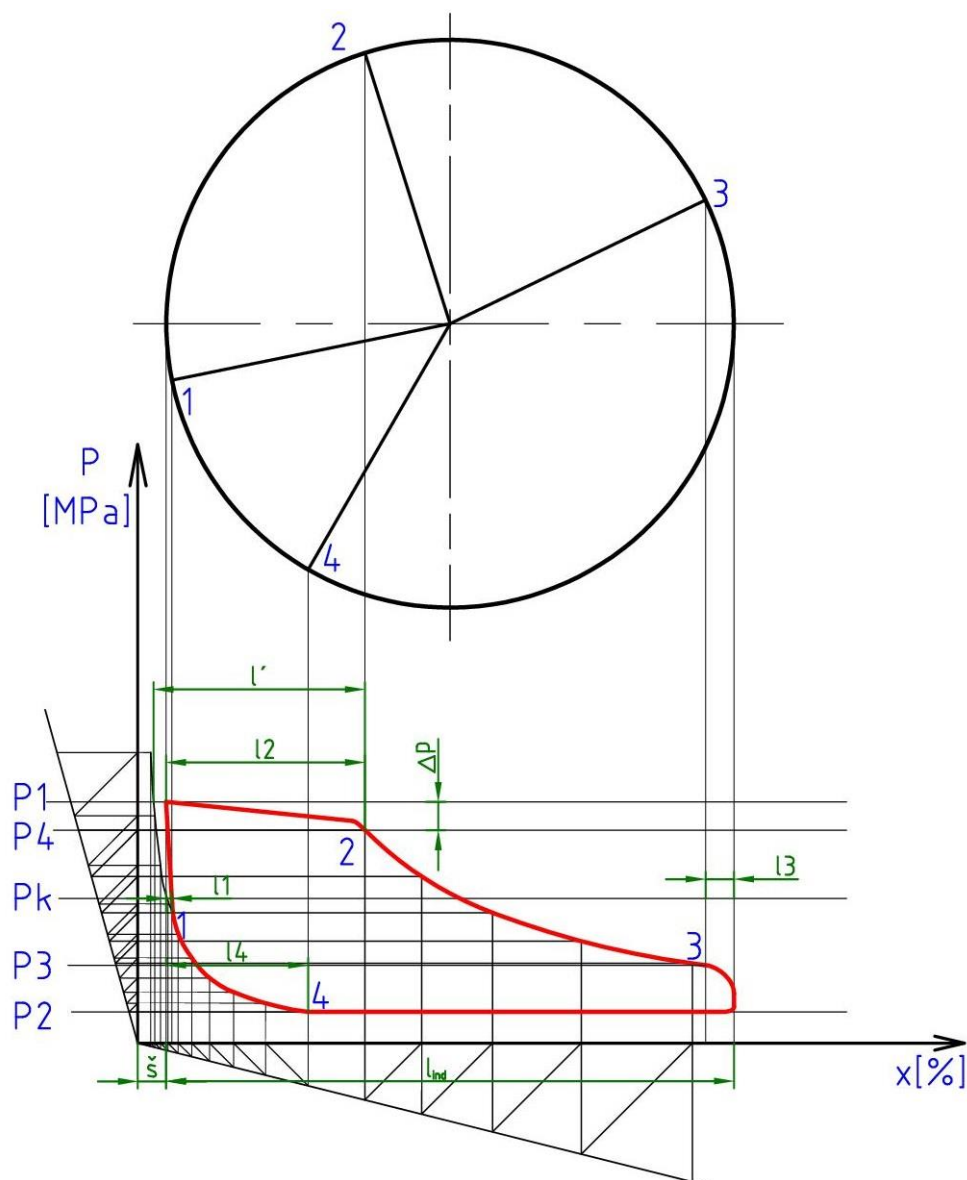
$D = 28 \text{ mm}$	průměr pístu
$L = 34 \text{ mm}$	délka zdvihu
$n = 400 \text{ min}^{-1}$	otáčky
$p_0 = 0,4 \text{ MPa}$	absolutní tlak páry v kotli

### 5.4.1 Výpočet výkonu parního stroje

Pro výpočet výkonu parního stroje je potřeba si nejdříve zkonstruovat indikátorový diagram. Potřebné hodnoty pro sestavení diagramu jsou voleny dle doporučení z literatury [9].

$\dot{s} = 10 \%$	škodný prostor
$l_1 = 1 \%$	předchozí vstup páry
$l_2 = 55 \%$	konec plnění

$l_3 = 7 \%$	předchozí výstup páry
$l_4 = 25 \%$	začátek komprese
$\Delta p = 0,02 \text{ MPa}$	ztráta tlaku v parovodu
$m = 1 [-]$	střední mocnitel pro sytou páru
$\eta_m = 87 \%$	mechanická účinnost
$l_{ind} = 100 \text{ mm}$	délka indikátorového diagramu
$p_{at} = 0,1 \text{ MPa}$	atmosférický tlak
$p_2 = 0,11 \text{ MPa}$	protitlak
$p_3 = 0,17 \text{ MPa}$	tlak na konci expanze



Obr. 5-12 Indikátorový diagram

Potřebné tlaky zobrazené na obr. 5-1 jsou získané z experimentálně stanovených vzorců, které jsou popsány v literatuře [9].



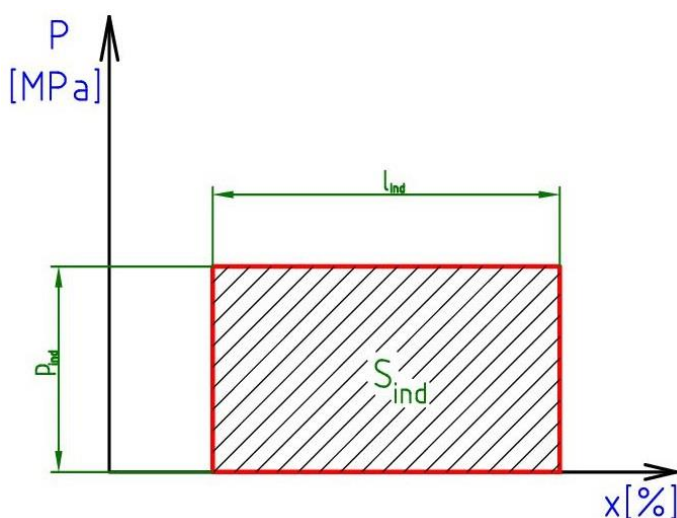
Tlak páry vstupující do válce krátkým parovodem lze zjistit pomocí tlaku v kotli.

$$p_1 = 0,9p_0 - 0,5ata = 0,9 \cdot 0,4 - 0,5 \cdot 0,1 = 0,31 \text{ MPa} \quad (1)$$

Tlak začátku expanze se získá jako rozdíl tlaku vstupujícího do válce a tlakových ztrát. Tlakové ztráty nastávají vlivem škrcení par v rozvodech a proudění v parovodu [9].

$$p_4 = p_1 - \Delta p = 0,31 - 0,02 = 0,29 \text{ MPa} \quad (2)$$

Jako měřítko diagramu na svislé ose bylo zvoleno  $2 \text{ mm} = 0,01 \text{ MPa}$  a vodorovná osa obsahuje procentuální část zdvihu válce. Pomocí programu Autocad byla zjištěna potřebná plocha indikátorového diagramu  $S_{ind} = 2134,7 \text{ mm}^2$ , která odpovídá práci cyklu. Pro získání potřebného středního indikovaného tlaku, nahradíme Indikovaný diagram jednodušším diagramem v podobě obdélníku o stejné ploše. Ze zjednodušeného diagramu se pomocí obsahu obdélníku a zvoleného měřítka odvodí střední indikovaný tlak.



Obr. 5-13 Náhradní indikovaný diagram

Ze zjednodušeného diagramu se pomocí obsahu obdélníku a zvoleného měřítka odvodí střední indikátorový tlak.

$$p_{ind} = \frac{0,01 \cdot S_{ind}}{2 \cdot l_{ind}} = \frac{0,01 \cdot 2134,7}{2 \cdot 100} = 0,1067 \text{ MPa} \quad (3)$$

Indikátorová práce pístu na jeden pracovní zdvih se získá pomocí spočítaného indikovaného tlaku a obsahu pístu. Pro výpočet obsahu pístu musíme počítat i s obsahem pístnice. Proto se plocha násobí součinitelem činné plochy  $\psi = 0,97$ .

$$A_{ind} = F \cdot L = p_{ind} \cdot S \cdot L = p_{ind} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \psi \cdot L \quad (4)$$

$$A_{ind} = 0,1067 \cdot 10^6 \cdot \frac{\pi \cdot 0,028^2}{4} \cdot 0,97 \cdot 0,034 = 2,167 \text{ J}$$

Indikátorový výkon se získá vynásobením práce otáčkami. Jelikož u pístu pracuje přední i zadní strana násobí se otáčky dvěma.

$$P_{ind} = A_{ind} \cdot \frac{2 \cdot n}{60} = p_{ind} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \psi \cdot L \cdot \frac{2 \cdot n}{60} \quad (5)$$

$$P_{ind} = 0,1067 \cdot 10^6 \cdot \frac{\pi \cdot 0,028^2}{4} \cdot 0,97 \cdot 0,034 \cdot \frac{2 \cdot 400}{60} = 28,9 \text{ W}$$

Efektivní výkon se získá vynásobením indikovaného výkonu mechanickou účinností.

$$P = P_{ind} \cdot \eta_m = 28,9 \cdot 0,87 = 25,14 \text{ W} \quad (7)$$

Pro návrh pístního těsnění a průměru rozvodového kanálu je třeba znát i střední pístovou rychlost.

$$c_s = \frac{2 \cdot L \cdot n}{60} = \frac{L \cdot n}{30} = \frac{0,034 \cdot 400}{30} = 0,45 \text{ ms}^{-1} \quad (8)$$

#### 5.4.2 Výpočet spotřeby páry

Výpočet spotřeby páry vychází z velikosti objemu páry, kterou se válec naplní do uzavření plnění. Důležitou hodnotou je také měrná hmotnost  $\rho'' = 1,65 \text{ kgm}^{-3}$ , kterou získáme z tabulek syté vodní páry podle tlaku  $p_1 = 0,31 \text{ MPa}$  [9, s.207]. Jelikož ve škodném prostoru zůstává zbytek páry, musíme prodloužit kompresní křivku až na tlak  $p_1$ , a z indikovaného diagramu na obr. 5-1 zjistit délku plnění se škodným prostorem  $l' = 18,5 \text{ mm}$ .

$$\dot{m} = m \cdot n = V \cdot \rho'' \cdot 2 \cdot n = S \cdot l' \cdot \rho'' \cdot 2 \cdot n \cdot 60 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot l' \cdot \rho'' \cdot 2 \cdot n \cdot 60 \quad (9)$$

$$\dot{m} = \frac{\pi \cdot 0,028^2}{4} \cdot 0,0185 \cdot 1,65 \cdot 2 \cdot 400 \cdot 60 = 0,9 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho''} = \frac{0,9}{1,65} = 0,55 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1} \quad (10)$$

## 6 DISKUZE

V této kapitole jsou shrnuty možné problémy konstrukce a výroby a jejich možná řešení. Kapitola se také zabývá celkovým zhodnocením výsledku.

### 6.1 Možné problémy

V předchozí kapitole bylo zvolené koncepční řešení detailně rozpracováno. Během celkové konstrukce bylo nutné řešit několik konstrukčních problémů, jako například dostatečné těsnění válce a kotle, mazání, nebo správné zvolení tolerancí. Snahou bylo navrhnout jednotlivé součásti tak, aby byly co nejjednodušeji vyrobitelné, a tím se zajistila ekonomičnost výroby. Další snahou bylo navrhnout součásti tak, aby byly vyrobitelné pomocí základních strojních operací jako například soustružení, vrtání nebo frézování. O jednotlivých problémech a jejich možném řešení pojednává tato kapitola.

#### 6.1.1 Těsnění válce a kotle

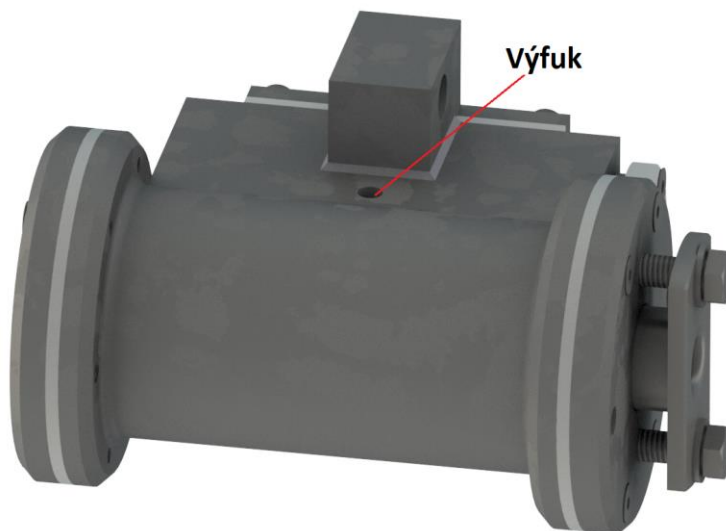
Aby byla zajištěna plná funkčnost, musí být válec a kotel plně zatěsněn. Pokud by tato podmínka nebyla splněna, stroj by ztrácel tlak a tím i výkon. Také by pára dříve zkondenzovala a mohla by se hromadit ve válci, kde by znemožnila správnou funkci stroje. To je řešeno pomocí silikonového těsnění, které je upevněno mezi víkem a válcem. Stejně řešení je u těsnění válce, kde je těsnění upevněno mezi trubkou kotle a víkem. Těsnění je ze silikonu z toho důvodu, že dobře odolává vyšším teplotám a je také dobře cenově dostupné. Ucpávkové šňůry, které těsní pístnici, je nutné co nejvíce přitlačit ucpávkovým víkem, aby nedošlo k úniku páry. Ucpávková šňůra musela být zvolena tak, aby zajistila správnou funkci i při maximální rychlosti pístnice, vydržela vyšší teploty a tlaky páry.

#### 6.1.2 Kondenzace

Kondenzace páry, je nechtěný děj, kterému je důležité se vyhnout. Při prvotním spuštění stroje je válec studený. To může způsobit, že pára vstupující do tohoto válce rychle zkondenzuje a bude se zde hromadit. Po nějaké době se válec ohřeje a tím se přebytečná voda může znovu přeměnit na páru, ale nemusí to být podmínkou.

Tento problém lze řešit vyvrtáním malých otvorů skrz válec v místě škodného prostoru, kterými by voda mohla unikat. Po zahřátí válce by se tyto otvory uzavřely pomocí ventilu, aby pára neunikala a stroj mohl mít maximální výkon.

Další místo, kde pára může kondenzovat je v místě výfuku. Jelikož byl stroj navržen jako výfukový, tudíž vyfukuje páru do okolí, může pára začít kondenzovat na povrchu šoupátkové komory. Umístění výfuku na stroji je vyznačeno na obrázku 6-1. Mohlo by nastat, že voda bude stékat zpátky do výfuku a tím zabráni prostupu vyfukované páry. Toto lze řešit dvěma způsoby. První je, že se na šoupátkovou komoru připevní rovná trubka, která bude odvádět páru dál od komory a tím se zabráni prostupu páry zpět do výfuku. Další způsob řešení je dosti konstrukčně složitý, ale disponuje mnohými výhodami. Pára se přivede do kondenzátoru, tím se stroj stane kondenzační. Kondenzační stroje vykazují velkou úsporu spotřeby páry, tepla i paliva.



Obr. 6-1 Výfuk

Kondenzace však může být v některých případech žádoucí. Manometr je navržen do maximálních teplot 60 °C, proto nemůžeme připojit manometr přímo do kotle. Z toho důvodu je zde kondenzační trubka, která zajistí, aby sytá pára neproudila přímo do manometru, ale aby nejdříve zkondenzovala na vodu v kondenzační trubce.

### 6.1.3 Stav vody v kotli

Do kotle se voda přivádí skrz vyvrtaný otvor v horní části kotle, který se poté uzavře pomocí zátky. Toto je jediný způsob, jak přivést vodu do kotle. Při vypařování vody může nastat situace, kdy voda dosáhne své kritické hladiny. Za kritickou hladinu se považuje hladina, kdy není plně ponořené topné tělísko. Pro měření hladiny v kotli slouží stavoznak, na kterém jsou vyznačeny maximální a minimální hladiny. Když se voda dostane pod kritickou hladinu, jediný způsob, jak znovu naplnit kotel, je ten, že se stroj vypne, pomocí pojistného ventilu se sníží tlak v kotli a poté se otevře zátk a doplní voda. Nevýhoda je ta, že pokud chceme stroj dále používat, tak v kotli musíme znovu získat potřebný přetlak. Tento způsob je nevhodný pro dlouhodobě pracující stroj.

Tento problém je možné řešit přidáním ruční pumpy do stroje. Tato pumpa by přečerpávala vodu z nádrže do kotle. Důležité je, aby ruční pumpa byla schopna vyvinout dostatečně vysoký tlak na to, aby překonala tlak uvnitř kotle. Ruční pumpu je možné vyrobit, nebo objednat z internetového obchodu [22].

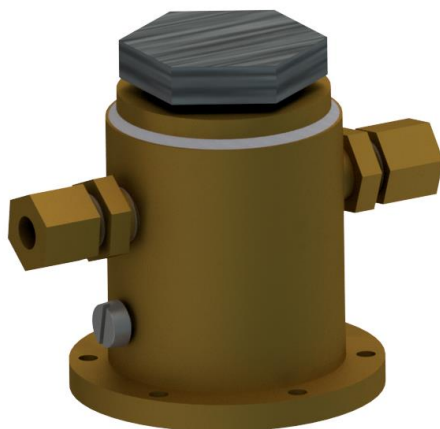


Obr. 6-2 Ruční pumpa [22]

### 6.1.4 Mazání

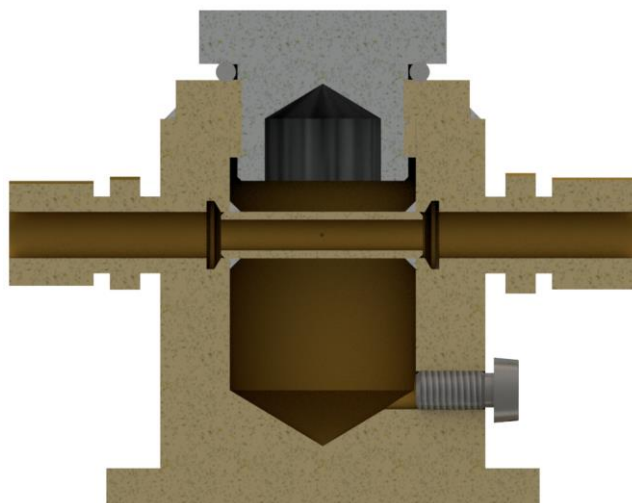
Mazání je zde prováděno pomocí tuhého maziva. Při montáži by se vnitřní plochy šoupátkové komory, válce a vedení měly mazat. Jelikož mazivo po nějaké době ztrácí na kvalitě, mělo by se po určité době aplikovat znova. Vodicí plochy a plochy šoupátkové komory se můžou namazat bez složité demontáže. Problém nastává při mazání vnitřní plochy válce. Válec je potřeba celý odmontovat z rámu, sundat víka a aplikovat mazivo.

Tento problém lze řešit přidáním speciální maznice, která je zobrazena na obrázku 6-3. Prvotní návrh stroje obsahoval tuto maznici, ale jelikož by maznice prodražovala výrobu a nebyla až tak nutná pro správnou funkci stroje, bylo od tohoto návrhu upuštěno.



Obr. 6-3 Maznice

Maznice je vytvořena z mosazné kruhové tyče, ve které je vyvrtán otvor. Tento otvor se naplní olejem a uzavře zátkou. Vnitřní trubkou o světlosti 4 mm, která je napájena na stěny maznice, proudí pára. Hadice se zde připojují pomocí pneumatického hrdla. Ve vnitřní trubce je vyvrtána malá díra o průměru 0,5 mm, která má za úkol přivádět do trubky malé množství oleje. Tento olej je dále pomocí páry rozveden do šoupátkové komory a do válce. Přebytečný olej se odpouští pomocí otvoru na dně, který je při provozu zajištěn šroubem.

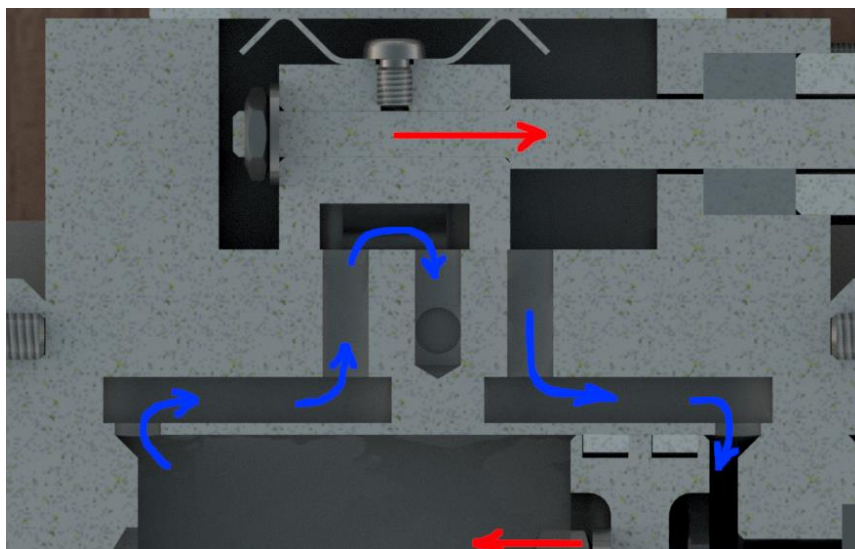


Obr. 6-4 Řez maznicí

## 6.2 Seřízení rozvodů

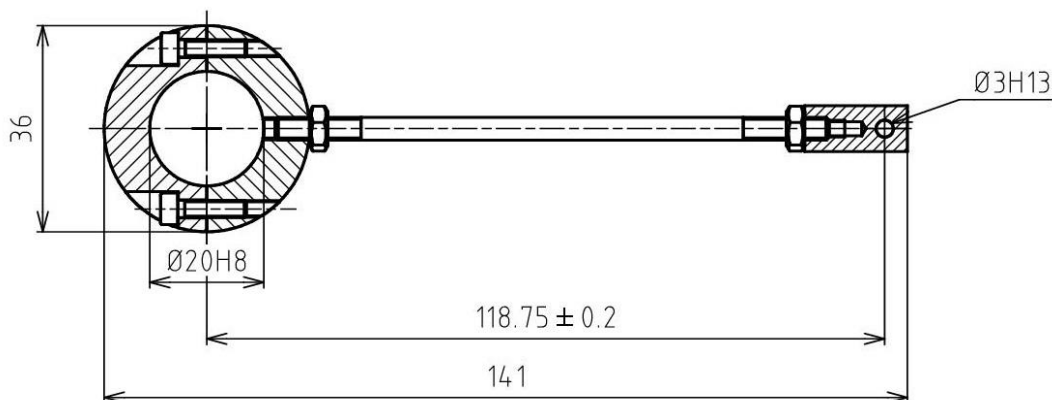
Správné navržení rozvodů je důležitým faktorem pro správnou funkci stroje. Problém, který může nastat u rozvodu je, že otevírání a zavírání rozvodových kanálů bude špatně načasované. To může způsobit nefunkčnost stroje. Důležité je nastavit potřebné parametry hned při první montáži.

Ze začátku se musí nastavit správné pootočení kliky vzhledem k výstředníku. Když je poloha kliky v pozici, kdy je píst v dolní úvrati, tak by šoupátko mělo plně odkrývat kanál, který je v pravé pozici, tudíž je šoupátko v horní úvrati. Toto nastavení by mělo odpovídat 90° pootočení výstředníku oproti klice.



Obr. 6-5 Poloha šoupátka oproti pístu.

Celková délka výstředníkového mechanismu se nastavuje při montáži pomocí výstředníkové tyče a matic. Seřízení funguje tak, že pootáčíme výstředníkovou pánví a kloubem, díky závitu se celková délka zkracuje nebo prodlužuje. Při správné vzdálenosti se poloha výstředníku a kloubu zajistí maticí. Celková délka je znázorněna na obrázku 6-4.



Obr. 6-6 Délka výstředníkového mechanismu.

## 6.3 Spuštění stroje

Po seřízení rozvodů a správném namazání ploch se stroj může uvést do chodu. Prvním krokem před spuštěním je naplnit kotel vodou. Správná hladina by se měla kontrolovat na stavoznaku. Po naplnění se otvor uzavře zátkou a O-kroužkem. Po zapojení topného tělíska do sítě se voda po nějaké době dostane do bodu varu a začne se zvyšovat tlak. Po naměřeném tlaku na manometru 4 bary se uvolní kulový ventil, aby se pára mohla dostat skrz hadice do šoupátkové komory. Poté se ručně otáčí setrvačníkem do té doby, než stroj začne běžet samostatně. Tím je stroj uveden do provozu. Při běhu stroje se kontroluje stav vody a potřebný tlak. Při naměřeném vyšším tlaku, než je tlak požadovaný, se ručně uvolní pojistný ventil. Tento ventil je možno nastavit tak, aby se při překročení určitého tlaku sám otevřel.

## 6.4 Cenový odhad

Celkový počet jednotlivých kupovaných součástí činí 83. Jsou zde započítány normované součásti jako jsou šrouby a matice, ale součet obsahuje i ozubená kola, stojany, těsnění, řemeny a různé pneumatické součástky. Celkový seznam kupovaných součástí lze najít v příloze 3. Počet vyráběných součástí je 53. Pro tyto součásti byla snaha použít co nejlevnější materiály jako jsou hliník a oceli nízkých tříd. Cenový odhad za výrobu těchto dílů se těžko odhaduje. Proto je zde jen cena za potřebný polotovár. Celková cena stroje, bez nákladů na práci činí 11 158kč.

Tab. 6-1 Cenový odhad jednotlivých součástí.

Název	Množství	Cena [kč]
Normalizované součásti	161	125,-
Kupované součásti	54	10143,-
Materiál	53	890,-
Suma	268	11158,-



## 7 ZÁVĚR

V rámci této práce byl navržen funkční model parního stroje, který by měl sloužit jako pomůcka pro pochopení principu parního stroje a ukázat, jak jeden z nejstarších pístových strojů funguje v praxi. Stroj byl navržen na základě rešerše, která shrnuje poznatky o parních strojích a jejich problematice. Z rešeršní části vycházejí tři koncepční řešení a u každého z nich byly analyzovány možné výhody a nedostatky. Jako nejvhodnější řešení byl zvolen parní stroj s plochým šoupátkem a bočním uložením komory, který je dále rozpracován do konstrukčního řešení.

Při konstrukci byl kladen důraz na co nejjednodušší a nejlevnější řešení a zároveň na to, aby byl stroj funkční a jednoduchý na údržbu. Důležitým aspektem konstrukce bylo dodržet jeho maximální zadané rozměry. Navržený parní stroj má rozměry 300 x 369 x 246 mm a váží 8,25 kg, tyto rozměry splňují počáteční cíl práce.

Výstup bakalářské práce představuje průvodní zpráva a výkresová dokumentace, čímž byly plně dosaženy stanovené cíle.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PALERMO, Elizabeth. Who Invented the Steam Engine? *Livescience* [online]. New York: Future US, 19. března 2014 [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/44186-who-invented-the-steam-engine.html>
- [2] TRONNER, Pavel. Jak lidstvo zkontrolovalo páru: Tvůrcem prvního parního stroje byl Thomas Newcomen. *VTM* [online]. 5. srpna 2019 [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: <https://vtm.zive.cz/clanky/jak-lidstvo-zkontrolovalo-paru-tvurcem-prvniho-parniho-stroje-byl-thomas-newcomen/sc-870-a-191960/default.aspx>
- [3] Parní stroj. Parnistroj [online]. [cit. 2020-11-06]. Dostupné z: <http://parnistroj.czweb.org/index.html>
- [4] Historie parního stroje. *Starestroje* [online]. [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <http://starestroje.cz/historie/historie.parniho.stroje.php>
- [5] BARTON, Bob. The History of Steam Trains and Railways. *Historic UK* [online]. England [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <https://www.historic-uk.com/HistoryUK/HistoryofBritain/Steam-trains-railways/>
- [6] DERR, Louis. Cyclopedia of Engineering. In: Clipart etc [online]. Florida: Florida Center for Instructional Technology, 1911 [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: [https://etc.usf.edu/clipart/77500/77524/77524\\_newcm\\_stmeng.htm](https://etc.usf.edu/clipart/77500/77524/77524_newcm_stmeng.htm)
- [7] NAVE, Carl R. The Savery engine. HyperPhysics [online]. Atlanta, Georgia: Georgia State University [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Kinetic/psav.htm>
- [8] M, Saif. Steam Engines: Parts, Types, Working Principle, and More. The Engineers Post [online]. 3.12.2019 [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://www.theengineerspost.com/steam-engines-types-parts/>
- [9] KLÁG, Josef. Parní stroje. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1953.
- [10] M, Saif. Compound Steam Engine: Types, Arrangement of Cylinders, Advantages and More. The Engineers Post [online]. 14.4.2020 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <https://www.theengineerspost.com/compound-steam-engine/>

- [11] What are Single Acting & Double Acting Hydraulic Cylinders. *VComp Inc* [online]. 18.12.2017 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://medium.com/@vcompmississauga/what-are-single-acting-double-acting-hydraulic-cylinders-817d6e6f30a8>
- [12] How compound steam engine work? HowMechanismWorks? [online]. [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://www.howmechanismworks.com/2017/07/how-compound-steam-engine-works.html>
- [13] Eccentric Rod. In: *FineDictionary* [online]. [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <http://www.finedictionary.com/Eccentric%20rod.html>
- [14] KŘIVÁNEK, Vladimír. Parní stroje. Brno: SPT, 1947.
- [15] KROUZA, Václav. Parní motory: [Určeno] pro posl. Vys. šk. stroj. inž. Praha: Státní nakladatelství učebnic, 1951. Učební texty vysokých škol.
- [16] ROTKOVSKÝ, Emil. Parní motory ... V Praze: Ústav pro učební pomůcky průmyslových a odborných škol, 1945. Zatímní učební texty.
- [17] MOORE, Sam. The Enduring Corliss Steam Engine. In: *Farm Collector* [online]. Kansas: Ogden Publications, 12.2017 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://www.farmcollector.com/steam-engines/corliss-steam-engine-zmlz17deczhur>
- [18] KONVIČKA, Vladislav. Parní stroje, parní turbíny, parní kotle: Parní rozvody. Nejen hornictví [online]. [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <http://podzemi.solvayovylomy.cz/stroje/pstroj1/020.htm>
- [19] DANIEL, John. Valve and piston layout and movement. The Great western Archive [online]. 2013 [cit. 2021-01-05]. Dostupné z: <http://www.greatwestern.org.uk/basic5.htm>
- [20] LUCA, Giangreco. Watt's Governor. In: *Multibody* [online]. [cit. 2021-01-05]. Dostupné z: <http://www.multibody.net/teaching/msms/students-projects-2019-2/watts-governor-2/>
- [21] What is Governor? What are main Types of Governor? *Mech4study* [online]. 2017 [cit. 2021-01-05]. Dostupné z: <https://www.mech4study.com/2017/12/what-is-governor-what-are-main-types-of-governor.html>

- [22] Ruční čerpadlo kotle na parní stroj. Banggood [online]. [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: [https://www.banggood.com/cs/Microcosm-M8-Live-Steam-Engine-Boiler-Hand-Feed-Pump-Parts-p-1411139.html?cur\\_warehouse=CN](https://www.banggood.com/cs/Microcosm-M8-Live-Steam-Engine-Boiler-Hand-Feed-Pump-Parts-p-1411139.html?cur_warehouse=CN)

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

$D$	průměr pístu
$L$	délka zdvihu
$n$	otáčky
$p_0$	absolutní tlak páry v kotli
$\check{s}$	škodný prostor
$l_1$	předchozí vstup páry
$l_2$	konec plnění
$l_3$	předchozí výstup páry
$l_4$	začátek komprese
$\Delta p$	ztráta tlaku v parovodu
$m$	střední mocnitel pro sytou páru
$\eta_m$	mechanická účinnost
$l_{ind}$	délka indikátorového diagramu
$atm$	atmosférický tlak
$p_2$	protitlak
$p_3$	tlak na konci expanze
$p_3$	tlak vstupující do válce
$p_4$	tlakové ztráty
$p_{ind}$	indikátorový tlak
$S_{ind}$	plocha indikátorového diagramu
$A_{ind}$	indikátorová práce
$P_{ind}$	indikátorový výkon
$\psi$	součinitel činné plochy
$F$	síla
$P$	efektivní výkon
$c_s$	střední pístová rychlost
$\dot{m}$	hmotnostní průtok

$\rho''$	měrná hmotnost
$l'$	délka plnění se škodným prostorem
$\dot{V}$	objem válce
$S$	plocha pístu

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

<b>Obr. 2-1</b>	Schéma prvního parního stroje [6].....	14
<b>Obr. 2-2</b>	Schéma Saveryho stroje na čerpání vody z dolů.....	15
<b>Obr. 2-3</b>	Schéma Wattova parního stroje s odstředivým regulátorem [4] .....	16
<b>Obr. 2-4</b>	První parní lokomotiva, kterou vynalezl Richard Trevithic roku 1804 [5]..	16
<b>Obr. 2-5</b>	Schéma jednočinného válce [11]. .....	17
<b>Obr. 2-6</b>	Schéma dvojčinného válce [11].....	18
<b>Obr. 2-7</b>	Schéma stejnosměrného parního stroje [9]. .....	18
<b>Obr. 2-8</b>	Tandemové uspořádání parního stroje [10].....	19
<b>Obr. 2-9</b>	Wolfický parní stroj [10].....	20
<b>Obr. 2-10</b>	Sdružený parní stroj [10].....	20
<b>Obr. 2-11</b>	Schéma Sdruženého stojatého stroje s trojnásobnou expanzí využívaný k pohonu lodí [12].....	21
<b>Obr. 2-12</b>	Výstředníkový mechanismus [13]. .....	22
<b>Obr. 2-13</b>	Jednoduché ploché šoupátko.....	23
<b>Obr. 2-14</b>	Corlisova šoupátka [17]. .....	23
<b>Obr. 2-15</b>	Pístové šoupátko [19] .....	24
<b>Obr. 2-16</b>	Trickovo šoupátko [16].....	24
<b>Obr. 2-17</b>	Schéma stabilního jednoválcového parního stroje s ventilovým rozvodem [16].....	25
<b>Obr. 2-18</b>	Wattův objímkový regulátor [20] .....	26
<b>Obr. 2-19</b>	Proellův regulátor [21] .....	27
<b>Obr. 2-20</b>	Hartnellův pružinový regulátor [21].....	28
<b>Obr. 4-1</b>	Koncepční řešení parního stroje s pístovým šoupátkem a s otevřeným vedením křížáku .....	30
<b>Obr. 4-2</b>	Koncepční řešení parního stroje s plochým šoupátkem a s uzavřeným vedením křížáku.....	31
<b>Obr. 4-3</b>	Koncepční řešení parního stroje s plochým šoupátkem s bočním uložením komory .....	32
<b>Obr. 5-1</b>	Konstrukční řešení parního stroje.....	34

<b>Obr. 5-2</b>	Samotný parní stroj .....	35
<b>Obr. 5-3</b>	Řez samotným parním strojem. ....	36
<b>Obr. 5-4</b>	Uložení ložiskové jednotky do rámu. ....	37
<b>Obr. 5-5</b>	Uložení vodícího ložiska. ....	37
<b>Obr. 5-6</b>	Výstředníkový mechanismus .....	38
<b>Obr. 5-7</b>	Regulátor.....	39
<b>Obr. 5-8</b>	Pákový mechanismus.....	40
<b>Obr. 5-9</b>	Škrťací klapka.....	41
<b>Obr. 5-10</b>	Regulační člen se škrťací klapkou .....	41
<b>Obr. 5-11</b>	Konstrukce kotle .....	43
<b>Obr. 5-12</b>	Indikátorový diagram.....	44
<b>Obr. 5-13</b>	Náhradní indikovaný diagram .....	45
<b>Obr. 6-1</b>	Výfuk.....	48
<b>Obr. 6-2</b>	Ruční pumpa [22].....	49
<b>Obr. 6-3</b>	Maznice .....	50
<b>Obr. 6-4</b>	Řez maznicí .....	50
<b>Obr. 6-5</b>	Poloha šoupátka oproti pístu .....	51
<b>Obr. 6-6</b>	Délka výstředníkového mechanismu.....	51



## 11 SEZNAM TABULEK

<b>Tab. 6-1</b>	Cenový odhad jednotlivých součástí.....	52
-----------------	---	----

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

<b>Příloha 1</b>	Výkresová dokumentace
<b>Příloha 2</b>	Digitální data
<b>Příloha 3</b>	Seznam kupovaných položek